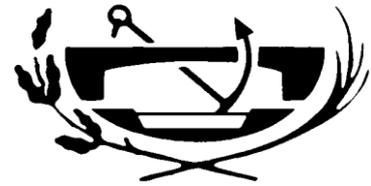




**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CARTAGENA**

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL**



***INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS
ESPECIALIDAD HIDROLOGÍA***

Proyecto Fin de Carrera

**CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA DE
RESALTOS HIDRÁULICOS LIBRES Y
SUMERGIDOS A PARTIR DE MEDICIONES DE
VELOCIDADES INSTANTÁNEAS CON EQUIPO
DOPPLER AGUAS ABAJO DE UN AZUD.
ANÁLISIS TEMPORAL Y FRECUENCIAL.**

DANIEL GARCÍA GARCÍA

Dirigido por:

D. LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ

Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

D. FCO. JAVIER PÉREZ DE LA CRUZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.

Cartagena, septiembre de 2009

Este Proyecto Fin de Carrera se lo quiero dedicar a mis padres, a mi abuela y a mis hermanos por tener tanta confianza en mí siempre.

También a mis tíos por haberme ofrecido su casa y su apoyo durante los años de carrera.

A mis compañeros y amigos que he hecho durante la carrera por haber hecho muy amenos estos tres años que he pasado con ellos.

A mi novia por haber estado estos tres años apoyándome y por animarme durante la realización de este proyecto final de carrera.

Al resto de mi familia y amigos.

Y ya más técnicamente a mis compañeros del proyecto Jesús, Belén y Esperanza, por ser unos buenos compañeros de trabajo.

También a Fco. Javier Pérez de la Cruz, por el gran esfuerzo que ha realizado durante la realización de este trabajo, por su paciencia, por su disponibilidad y por su gran ayuda.

Por último, a Dr. Luis G. Castillo por acogerme en este trabajo fin de carrera, por haber tenido tanta paciencia con nosotros.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
1. OBJETIVOS	9
2. RESUMEN	10
3. TRABAJO EXPERIMENTAL Y FILTRADO DE DATOS.	38
3.1. Trabajo de laboratorio.	38
3.2 Filtrado de datos.	47
4. LIMITACIONES DEL EQUIPO	54
4.1. Sonda.	54
4.2. Canal.....	54
4.3. Hoja de Cálculo.	54
5. BASES TEÓRICAS.	56
5.1. Estructura de control. Aliviadero WES.....	56
5.2. Flujo sobre el vertedero	57
5.3. Resalto hidráulico.....	57
5.4. Tipos de resaltos hidráulicos.	58
5.5. Pérdidas de Energía.....	60
6. ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL	61
6.1. Introducción.....	61
6.2. Condiciones de flujo y características de la longitud del resalto....	61
6.2.1. Resaltos Hridráulicos Libres.....	61
6.2.1.1. Características de la longitud del resalto.....	61
6.2.2. Resalto Hidráulico Sumergido.....	63
6.2.2.1. Características de la longitud del resalto.....	63
6.3. Relación entre calados inicial y final.....	64
6.4. Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos.....	69
6.4.1. Resaltos Hidráulicos Libres	69
6.4.2. Resaltos Hidráulicos Sumergidos	73
6.5. Longitud del resalto hidráulico	84

6.5.1. Resaltos Hidráulicos Libres	84
6.5.2. Resaltos Hidráulicos Sumergidos	86
6.6. Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos	89
6.6.1. Caída de velocidad máxima	98
6.6.1.1. Resaltos Hidráulicos Sumergidos.....	98
6.6.1.2. Resaltos Hidráulicos Libres.....	103
6.7. Descomposición frecuencial del espectro de turbulencia de las series de velocidades.	107
6.7.1. Introducción	107
6.7.2. Transformada de Fourier	107
6.7.2.1. Transformada de Fourier de parámetro continuo.....	107
6.7.2.2. Transformada de Fourier de parámetro discreto	109
6.7.3. Análisis de la turbulencia de las series de velocidades mediante la Transformada Rápida de Fourier	112
6.7.3.1. Transformada Rápida de Fourier. Aplicación.	112
6.7.3.2. Análisis de las señales	113
6.7.3.2.1. Análisis de las velocidades fluctuantes en el eje X (V_x'), en el eje Y (V_y') y de la cortante entre ambas ($V_x'V_y'$)	113
6.7.3.2.2. Comparaciones y observaciones resultantes del análisis de las distintas componentes.....	126
7. CONCLUSIONES.....	132
ANEXO I. PERFILES DE VELOCIDAD PARA CADA RESALTO ANALIZADO.	134
ANEXO II. RESULTADOS DEL FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMAÑAS DE MUESTREO	144
ANEXO III. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS.....	163
ANEXO IV. ESPECTROS DE TURBULENCIA DE LAS VELOCIDADES FLUCTUANTES Y DE LA CORTANTE	166
BIBLIOGRAFÍA.....	191

INTRODUCCIÓN

A. Definición del trabajo

En este proyecto fin de carrera se realiza el estudio del comportamiento del flujo en un canal rectangular en el que se han formado diferentes resaltos hidráulicos aguas abajo de un aliviadero. Este fenómeno hidráulico se desarrolla en flujo permanente rápidamente variado; este tipo de flujo ocurre cuando la profundidad no cambia con respecto al tiempo, pero espacialmente el cambio de profundidad se produce de forma abrupta en distancias relativamente cortas.

B. Descripción del canal de laboratorio y de los elementos para la adquisición de datos con ADV

El trabajo experimental desarrollado en este proyecto fin de carrera consistió en la medida de velocidades instantáneas mediante un equipo Doppler en distintos tipos de resaltos producidos en un canal de laboratorio; así como la medida de otros parámetros característicos de los resaltos, como la longitud de resalto y las profundidades inicial y final utilizando un limnómetro. Posteriormente se comparan los resultados experimentales con trabajos ya afianzados. A continuación se muestra una descripción del canal y de los elementos para la adquisición de datos con ADV.

▪ Descripción de los elementos del canal

La figura 1.1 muestra los principales elementos que componen el canal sobre el que realizamos el estudio:

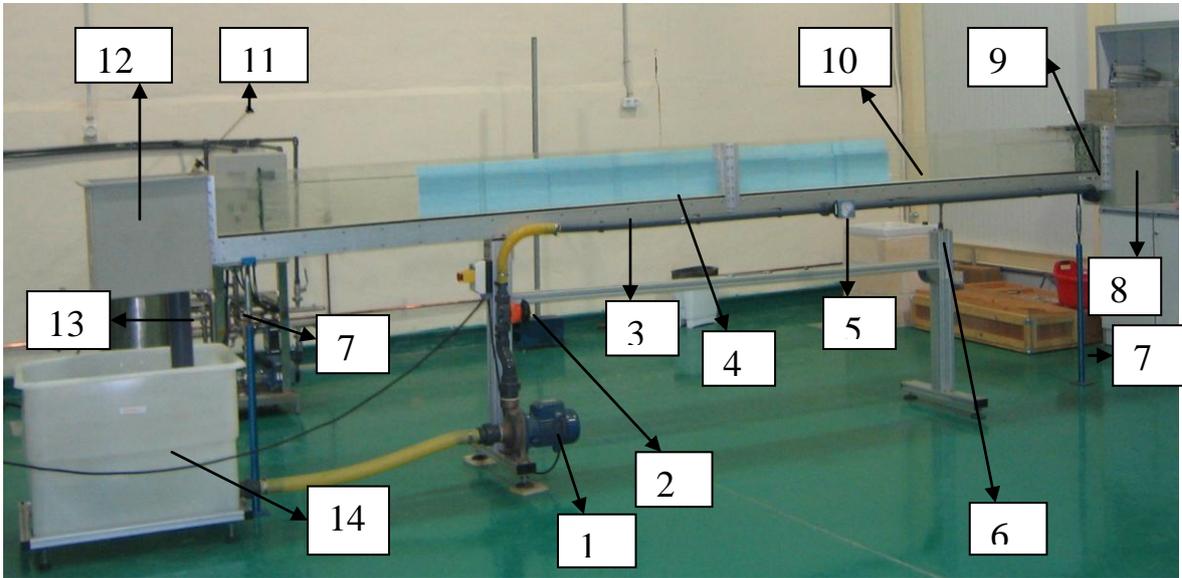


Figura 1.1. Elementos del canal de laboratorio (Márquez, 2006)

De manera que:

1. Bomba de alimentación
2. Válvula de membrana reguladora del caudal
3. Tubería de impulsión
4. Solera del canal
5. Caudalímetro
6. Soporte con regulación de altura
7. Soportes niveladores de la pendiente del canal
8. Depósito tranquilizador suplementado
9. Tranquilizadores de flujo
10. Sección del canal de 81 x 250 x 5000 mm de longitud
11. Regulador del calado del agua en el canal
12. Depósito regulador del calado del agua
13. Tubería de retorno
14. Depósito de almacenamiento

Descripción de los elementos para la adquisición de datos con ADV

Las figuras 1.2.a, 1.2.b, 1.2.c, 1.2.d, 1.2.e, muestran los distintos elementos necesarios para realizar mediciones de velocidad con ADV:

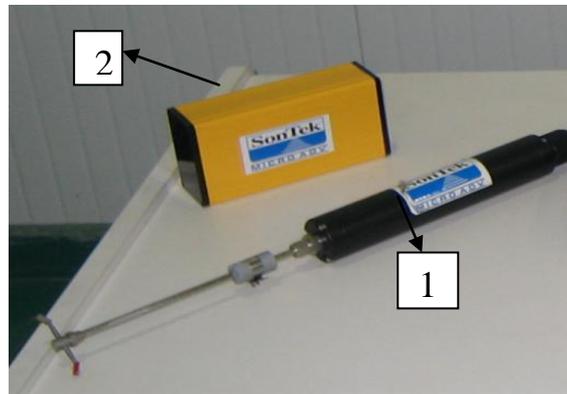


Figura 1.2.a. Sonda SonTek ADV Bidimensional y receptor (Márquez, 2006)



Figura 1.2.b. Sonda SonTek ADV Tridimensional (hacia arriba) y receptor

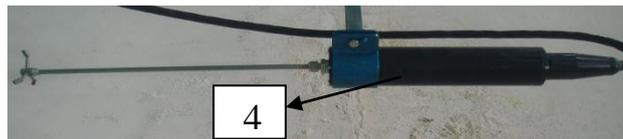


Figura 1.2.c. Sonda NorTek ADV Tridimensional

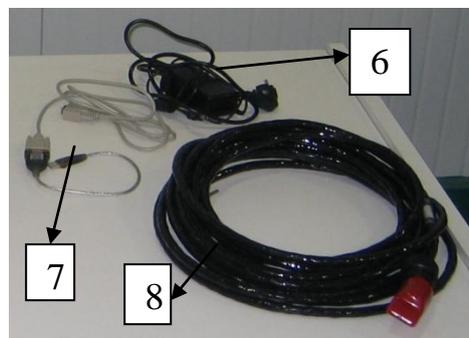


Figura 1.2.d. Cable de comunicaciones (Márquez, 2006)

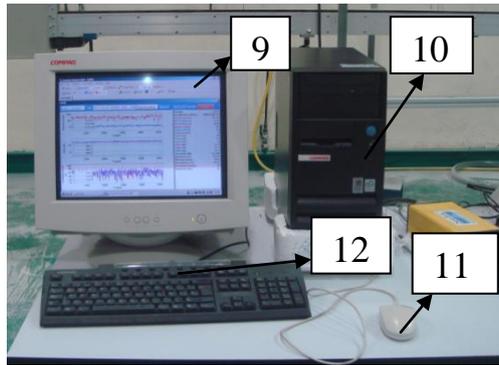


Figura 1.2.e. Ordenador para procesar las muestras.

Son los siguientes:

1. Sonda 2D de 16 MHz MicroADV (SonTek). Toma como superficie de referencia la solera del canal.
2. Módulo de procesamiento ADVfield a prueba de salpicaduras
3. Sonda 3D (hacia arriba) de 16 MHz MicroADV (SonTek). Toma como superficie de referencia la superficie del agua
4. Sonda 3D de 16 MHz MicroADV (NorTek). Toma como superficie de referencia la solera del canal.
5. Sonda 3D de 16MHz MicroADV (SonTek). Toma como superficie de referencia la solera del canal.
6. Cable de alimentación del procesador
7. Cable para comunicar el módulo de procesamiento al ordenador
8. Cable de unión entre la sonda y el procesador
9. Pantalla de Ordenador
10. Pc HP Compaq con 20GB de Disco duro
11. Ratón
12. Teclado

La figura 1.3 muestra los principales elementos de la sonda:

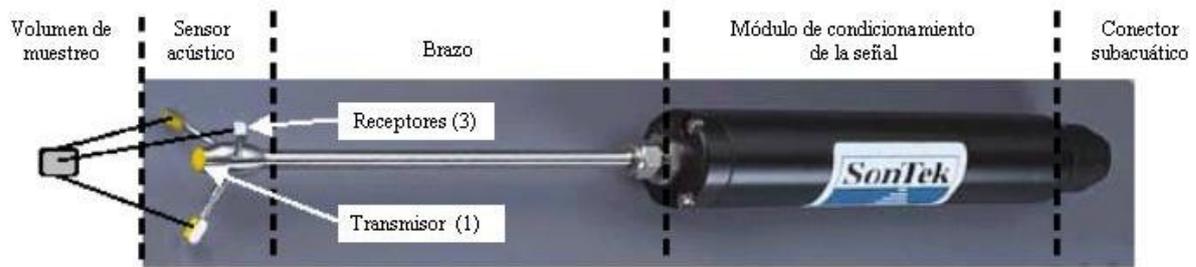


Figura 1.3. Elementos principales de la sonda SonTek Tridimensional hacia abajo (Márquez, 2006)

OBJETIVOS.

- Un primer objetivo es el aprendizaje y correcto uso de una de las nuevas técnicas e instrumentación asociada para la medición de las velocidades instantáneas en un flujo en lámina libre.
- Un segundo objetivo es la adquisición de datos por medio del equipo Doppler, y la comprobación y contrastación teórico-experimental de las distribuciones de velocidad; así como un filtrado numérico de los datos.
- Un tercer objetivo es la ampliación de medidas existentes y un estudio paramétrico de la distribución de velocidades instantáneas y medias, y la disipación de energía, en función del número de Froude, en distintas posiciones del resalto hidráulico libre aguas abajo de un aliviadero.
- Un cuarto objetivo es el aprendizaje de la descomposición frecuencial de la turbulencia de las series de velocidades mediante técnicas sencillas como es la Transformada Rápida de Fourier.

2. RESUMEN

El trabajo realizado en el siguiente proyecto fin de carrera se divide en dos partes principales:

- Una parte experimental y de tratamiento de datos para el estudio paramétrico de los resaltos hidráulicos.
- Una parte de análisis donde se exponen las formulaciones de los temas que trata el proyecto fin de carrera y donde se contrastan los datos obtenidos con trabajos experimentales ya afianzados.

En este proyecto se han realizado medidas de flujo en lámina libre, principalmente de velocidades instantáneas dentro del seno de algunos resaltos hidráulicos libres y sumergidos aguas abajo de un aliviadero. A continuación se hace una comparación y contrastación de los resultados obtenidos en la práctica con trabajos experimentales ya afianzados. Una vez hecho el análisis crítico, se proponen nuevas leyes y se extraen las conclusiones más importantes.

Los puntos principales que se han tratado en la realización de este proyecto son los siguientes:

▪ **Configuración de la sonda**

Uno de los parámetros más importantes del ADV es la configuración del rango de velocidad. Determina la velocidad máxima que puede ser medida por el instrumento. Las configuraciones del rango de velocidad estándares para la sonda 16/10 MHz ADVs son ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , y ± 250 cm/s. Por lo general, se debe escoger la configuración del rango de velocidad más baja que cubra la velocidad máxima esperada en un ensayo dado. El ruido generado por el instrumento en los datos de velocidad es proporcional a la configuración de rango de velocidad; altos rangos de velocidad tienen niveles de ruido más altos. El valor establecido fue ± 100 cm/s en la mayoría de los casos, llegando a usar en algún caso ± 250 cm/s; y la frecuencia de muestreo que fue de 5 Hz para todas las series de velocidades, añadiendo muestreos de 25 y 50 Hz para el análisis de Fourier. Otro parámetro fundamental es la salinidad, cuyo valor estimado fue de 2 ppt.

- **Rango de caudales de trabajo**

Se realizó un aforo volumétrico para determinar el caudal real que circula por el canal para cada caudal indicado en el caudalímetro del propio canal. Los caudales de trabajo son:

Q caudalímetro (m ₃ /h)	Q real (m ₃ /h)
4,5	5,3795
5,5	6,5155
6,5	7,6515
7,5	8,7875
8,5	9,9235
9,5	11,0595
10,5	12,1955
12	13,8995

Tabla 1. Caudales de trabajo

Estructura de control.

Para este trabajo se han estudiado resaltos hidráulicos libres y sumergidos al pié aguas abajo de un aliviadero como el de la figura siguiente.



Figura 2.1. Estructura de control

- **Tipos de resaltos estudiados**

Para cada caudal se han obtenido tres tipos resaltos distintos, los cuales se han ido desplazando aguas abajo de la estructura de control. Son los siguientes:

- (a) Un resalto hidráulico libre estabilizado al pie del aliviadero (R.L.0).

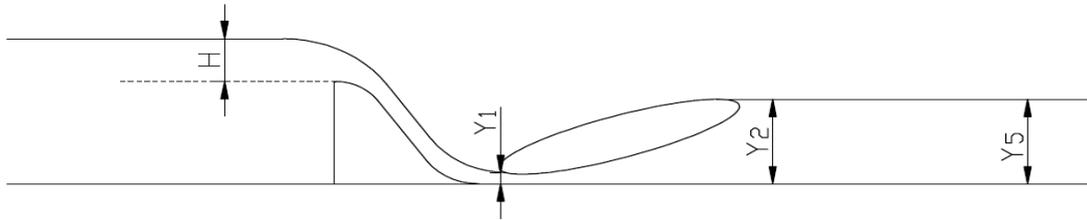


Figura 2.2. Resalto libre estabilizado al pie del aliviadero.

- (b) Un resalto hidráulico sumergido estabilizado al pie del aliviadero y con sumergencia igual a la altura del aliviadero, 14.8 cm. (R.S.1).

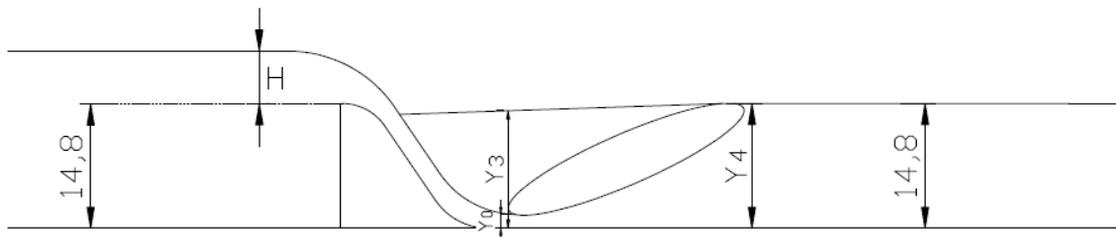


Figura 2.3. Resalto al pie del aliviadero sumergido a 14.8 cm

- (c) Por último un resalto hidráulico sumergido estabilizado al pie del aliviadero y con sumergencia igual a la altura del aliviadero + H/2 cm. (R.S.2).

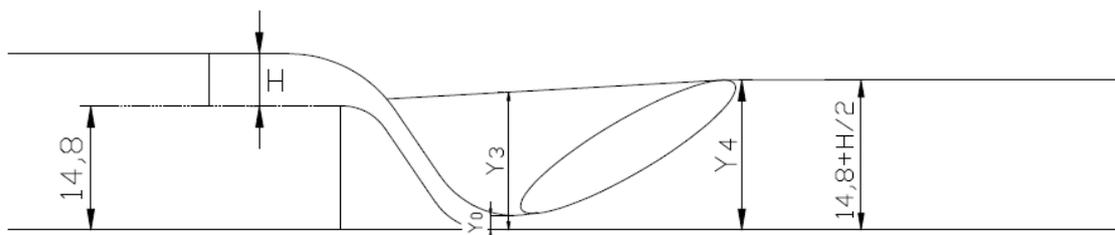


Figura 2.4. Resalto al pie del aliviadero sumergido a 14.8cm + H/2

- **Criterio establecido para obtener la longitud de resalto**

Para los resaltos libres hemos utilizado la fórmula de Silvester (1964) por ser la que mejor se ajustaba a los datos de flujo no desarrollado como comprobaron Márquez (2006), García (2008) y Vicente (2008). Para los resaltos sumergidos no hemos tomado su longitud verdadera, sino que hemos tomado la misma longitud que tenía el resalto libre con mismo caudal para que las secciones de estudio estuvieran situadas en el mismo sitio tanto en el libre como en los sumergidos.

$$L_j / y_1 = 9.75(F_1 - 1)^{1.01} \quad (2.1)$$

Siendo:

L_j : longitud del resalto

y_1 : calado contraído

F_1 : n° de Froude

- **Secciones estudiadas para cada resalto**

La mayoría de las secciones estudiadas se localizan dentro de la longitud de resalto considerada. Las seis secciones analizadas son las siguientes:

- (a) Sección 0; localizada al inicio del resalto (en nuestro caso, en el pie del aliviadero).
- (b) Sección 1; localizada a $1/4L_j$ (un cuarto de la longitud de resalto considerada).
- (c) Sección 2; localizada a $1/2L_j$.
- (d) Sección 3; localizada a $3/4L_j$.
- (e) Sección 4; localizada a una distancia igual a la longitud del resalto.
- (f) Sección 5; localizada a una distancia intermedia entre el final de la longitud de resalto estimada y la mitad del canal (punto hasta el cual el canal es completamente horizontal).

- **Filtrado de datos.**

FILTRADO DIGITAL DE DATOS.

MÉTODO DE FILTRACIÓN: UMBRAL DE ACELERACIÓN, Y POSTERIOR DESCARTE DE LOS ESTADÍSTICOS 5% Y 95%.

Debido que la interposición de las burbujas en el camino de las ondas sónicas emitidas por el equipo ADV dan lugar a mediciones erróneas con valor en el extremo negativo, es necesario un previo filtrado de los datos para su análisis.

Para desechar estas mediciones erróneas se ha procedido a un filtrado de las series de datos en el que se descartan las mediciones que sobrepasen un umbral de aceleración (Castillo, 2009), y, una vez pasado este filtro, se descartan las mediciones que sobrepasen los estadísticos 5% y 95% (Castillo, 2008). Para ello, calculamos aceleración máxima, en función del calado y del Froude, que no podrá exceder la serie y que representará nuestro umbral de corte λ_a

$$a_{m\acute{a}x} = \frac{v}{\Delta t} = \frac{Fr\sqrt{g\cdot y}}{\Delta t} \quad (2.2)$$

$$a_{m\acute{a}x}(cm/s^2) = \frac{Fr\sqrt{g\cdot y}}{\Delta t} = 156.6Fr\sqrt{y} \quad (2.3)$$

$$\lambda_a = 156.6Fr\sqrt{y} \geq 0.5 \quad (2.4)$$

Calculamos la aceleración de muestreo:

$$a = [(u_{i+1}) - (u_{i-1})] / \Delta t \quad (2.5)$$

siendo u_i la velocidad en el instante i

Identificamos aquellos puntos que sobrepasan el umbral establecido y que tomaremos como anómalos (spikes) y los reemplazamos.

Por último, aplicaremos el corte progresivo de los límites inferior y superior en función de los estadísticos 5% y el 95 %. Para ello el filtro establece una amplitud centrada en la media igual a dos veces la diferencia entre el valor máximo de la serie y la media.

Diferencia entre el valor máximo de la serie y la media: $A1 = Xmax - Xmedia$

Amplitud de la serie: $A = Xmax - Xmin$

Valor máximo después del primer filtrado: $Xmax,c = Xmax - (A * 0.05)$

Valor mínimo después del primer filtrado: $Xmin,c = Xmin + (A * 0,05)$

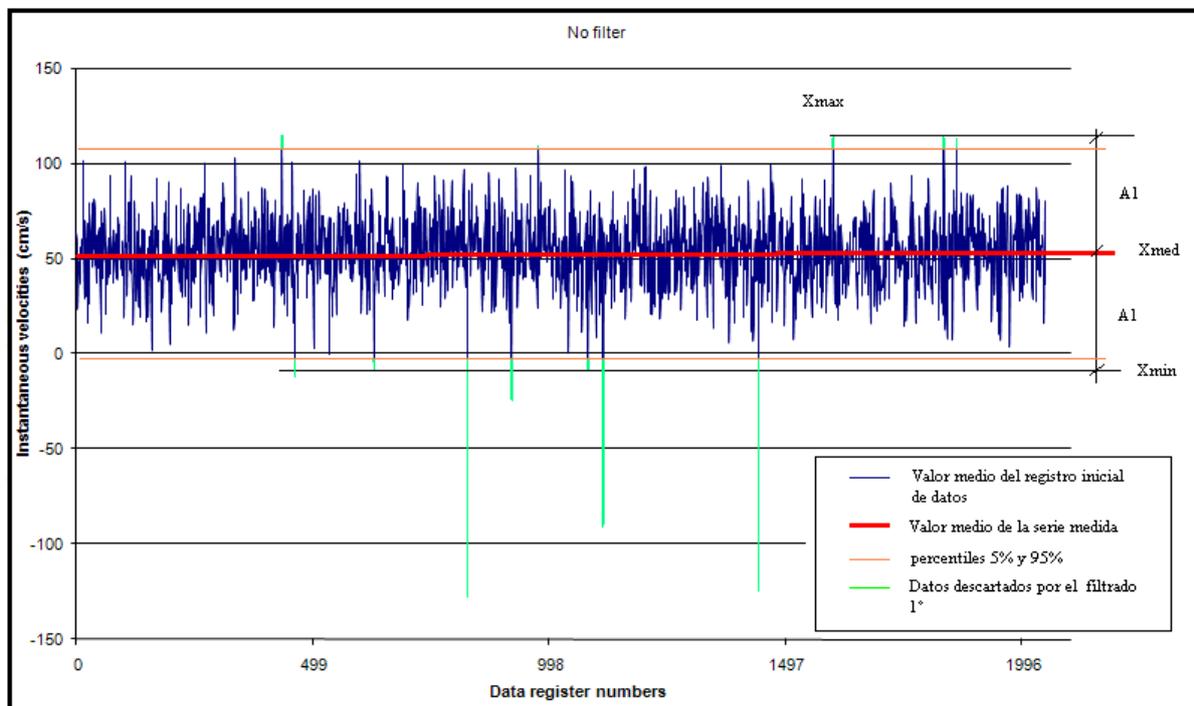


Figura 2.5. Esquema de funcionamiento del filtro estadístico

MODELO DE TRATAMIENTO DE DATOS													
ΔT (s)	0,20												
F	1,84												
y (cm)	6,35												
$a_{m\acute{a}x}$ teórica (cm/s ²)	723,99												
$a_{m\acute{a}x}$ (cm/s ²)	723,99												
		S. ORIGINAL	FILTRADO UMBRAL ACELERACIÓN			FILTRADO ESTADÍSTICO DE LA SERIE FILTRADA POR ACELERACIÓN							
						1º Filtrado		2º Filtrado		3º Filtrado		4º Filtrado	
Sample	Time (s)	V1/X/E	Acel	Vel	VEL_FILTR	L superior	L inferior	L superior	L inferior	L superior	L inferior	L superior	L inferior
1	0,0	38,54				38,54	38,54	38,54	38,54	38,54	38,54	38,54	38,54
2	0,2	28,82	-48,60	28,82	28,82	28,82	28,82	28,82	28,82	28,82	28,82	28,82	28,82
3	0,4	10,33	-92,45	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33
4	0,6	-135,52001	-729,25	0,00	26,35	-135,52	-68,30	-68,30	-55,38	-55,38	-46,29	-46,29	-38,33
5	0,8	20,79	781,55	0,00	26,35	20,79	20,79	20,79	20,79	20,79	20,79	20,79	20,79
6	1,0	77,28	282,45	77,28	77,28	77,28	77,28	77,28	77,28	77,28	77,28	77,28	77,28
7	1,2	-4,49	-408,85	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49	-4,49
8	1,4	58,04	312,65	58,04	58,04	58,04	58,04	58,04	58,04	58,04	58,04	58,04	58,04
9	1,6	56,76	-6,40	56,76	56,76	56,76	56,76	56,76	56,76	56,76	56,76	56,76	56,76
...
4096	819,0	20,87	-203,45	20,87	20,87	20,87	20,87	20,87	20,87	20,87	20,87	20,87	20,87
Mediana=		27,41			26,35	27,41		27,41		27,41		27,41	
Desv. Est.=		40,41695644			32,93	33,73		32,14		30,93		29,71	
Xmedia=		22,70694335			25,65	24,72		25,29		25,71		26,05	
Xmáx=		123,83			123,83	113,72		104,82		96,86		89,75	
A1=		101,1230566			98,18	89,00		79,53		71,15		63,70	
Xmín=		-78,4161133			-72,53	-64,28		-54,24		-45,45		-37,64	
A=		202,2461133			196,36	178,00		159,06		142,31		127,39	
A ^{0,05} =		10,11230566			9,82	8,90		7,95		7,12		6,37	
Xmáx c=		113,7176943			114,01	104,82		96,86		89,75		83,38	
Xmín c=		-68,3038076			-62,71	-55,38		-46,29		-38,33		-31,27	

Figura 2.6. Resumen de la hoja de filtrado.

▪ **Características de la longitud del resalto**

Puesto que en trabajos anteriores se demostró que la longitud del resalto en flujos no desarrollados se ajustaba a la ley propuesta por Silvester (1964), en este proyecto se ha tomado esa ley como válida para las longitudes de nuestros resaltos.

En la figura 2.7 se presenta la relación $L_j / y_1 = f(F_1)$ junto con la ecuación propuesta por Silvester (1964):

$$L_j / y_1 = 9,75(F_1 - 1)^{1,01} \tag{2.6}$$

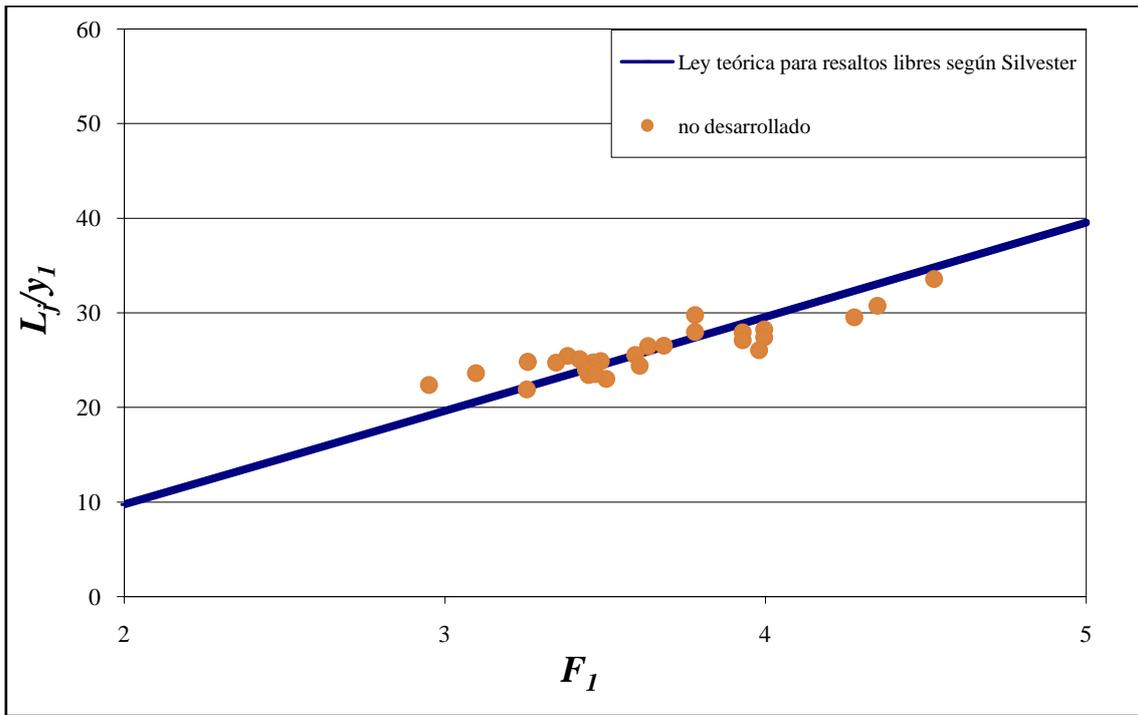


Figura 2.7. Características de la longitud del resalto hidráulico.

Para el caso de los resaltos sumergidos hemos tomado la misma longitud que para los libres.

- **Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos**

- Resaltos hidráulicos libres

La pérdida de energía H_L entre el inicio y el final del resalto libre puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$H_L = H_1 - H_2 = (v_1^2/2g + y_1) - (v_2^2/2g + y_2) \quad (2.7)$$

donde:

$$H_1 = \frac{V_1^2}{2g} + y_1$$

$$H_2 = \frac{V_2^2}{2g} + y_2$$

Utilizando la ecuación 2.7 junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{H_L}{H_1} = \frac{2\left(1 - \frac{y_2}{y_1}\right) + \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2}\right)F_1^2}{2 + F_1^2} \quad (2.8)$$

La relación $H_L / H_1 = f(F_1)$ se muestra en la figura 2.8:

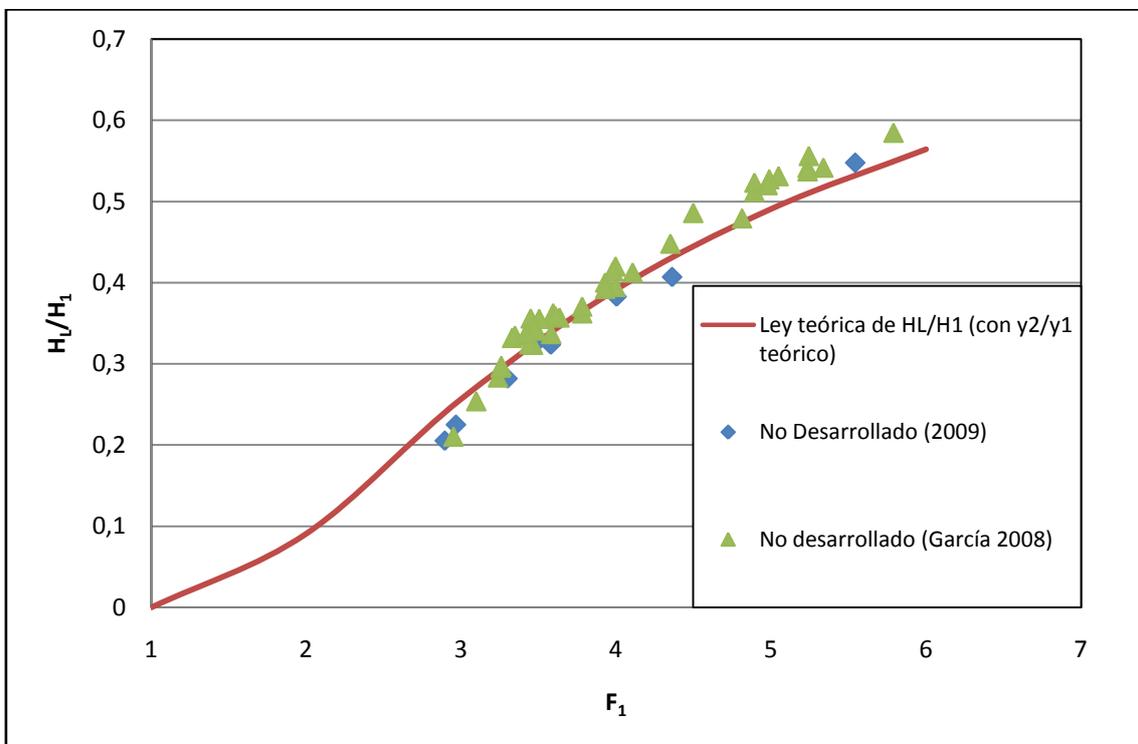


Figura 2.8. Pérdida de energía relativa en resaltos libres.

Analizando la representación de la pérdida de energía, se observa que los valores experimentales para el flujo no desarrollado son inferiores o iguales que los teóricos hasta un $F_1=4.5$, y a partir de ahí es superior.

- Resaltos hidráulicos sumergidos

La pérdida de energía entre el inicio y el final del resalto sumergido puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$H_L = H_0 - H_4 = (V_0^2/2g + y_3) - (V_4^2/2g + y_4) \quad (2.9)$$

donde

$$H_0 = \frac{V_0^2}{2g} + y_3$$

$$H_4 = \frac{V_4^2}{2g} + y_4$$

Utilizando la ecuación anterior junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{H_L}{H_0} = \frac{2\left(\frac{y_3}{y_0} - \frac{y_4}{y_0}\right) + (1 - 1/(y_4/y_0)^2)F_0^2}{2(y_3/y_0) + F_0^2} \quad (2.10)$$

En la figura 2.9 se muestra la relación $H_L/H_0 = f(F_0, \frac{y_3}{y_0})$ para valores dados de $\frac{y_3}{y_0}$

Se puede observar que los datos medidos dan una mayor pérdida de energía. Pero esta sólo es aparente, puesto que los resaltos sumergidos se alejan de la configuración teórica.

Del análisis del resalto y con el ánimo de ver la diferencia con la configuración de flujo teórico, los datos medidos fueron trasladados a la gráfica a su posición correcta; así se despejó, de la ecuación 2.10, el valor teórico del calado conjugado y_{3t} correspondiente.

En la figura 2.10 se puede ver el resultado obtenido.

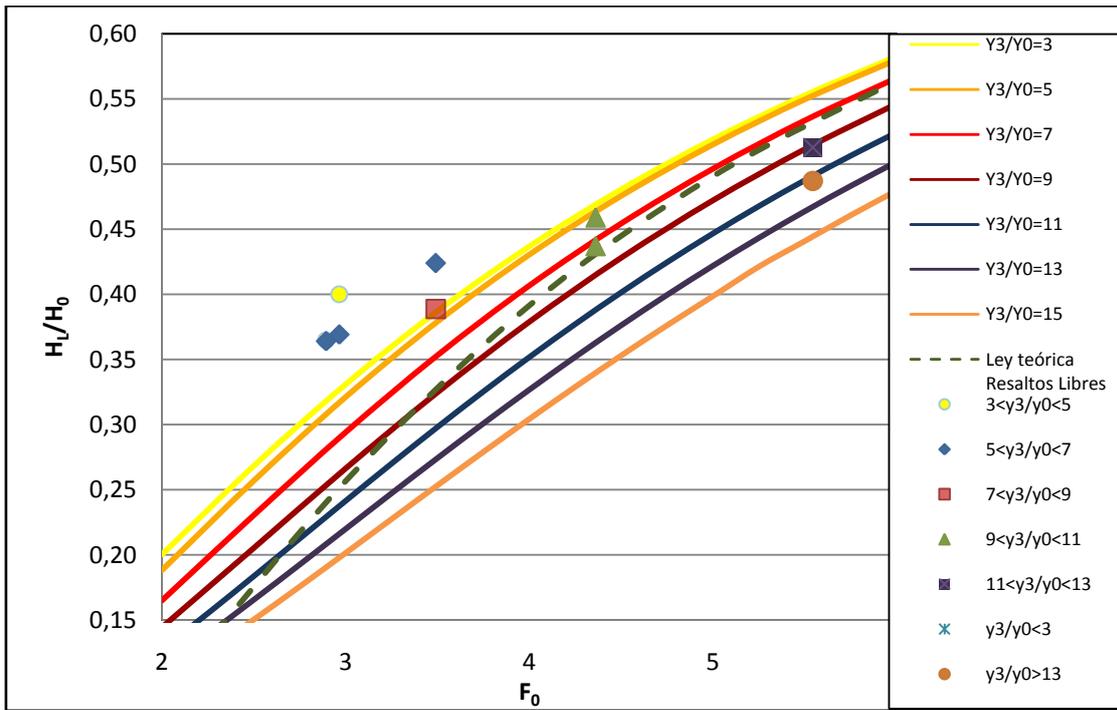


Figura. 2.9. Pérdida relativa de energía en resaltos sumergidos

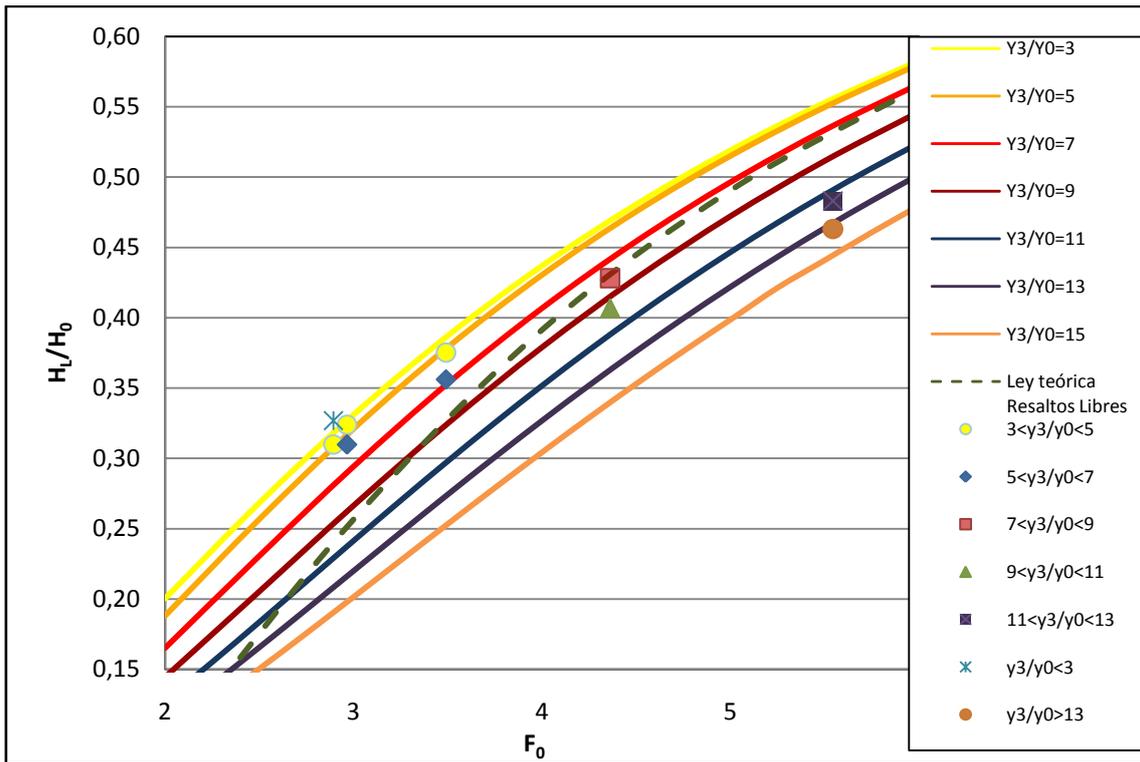


Figura. 2.10. Pérdida relativa de energía en resaltos sumergidos. $H_L/H_0 = f\left(F_0, \frac{y_3}{y_0}\right)$

Esta figura aclara que la pérdida de energía teórica en un resalto sumergido es mayor que la correspondiente en el resalto libre en un rango aproximado $1 < \frac{y_3}{y_0} < 7$. En otras

palabras, bajo ciertas condiciones de sumergencia, es posible hacer un uso efectivo del resalto sumergido como disipador de energía.

La relación $H_L/H_0 = f(F_0, \frac{y_3}{y_0})$ para valores dados de F_0 , junto con la ecuación 2.10

$$\frac{H_L}{H_0} = \frac{2\left(\frac{y_3}{y_0} - \frac{y_4}{y_0}\right) + (1 - 1/(y_4/y_0)^2)F_0^2}{2(y_3/y_0) + F_0^2}, \text{ se muestra en la figura 2.11:}$$

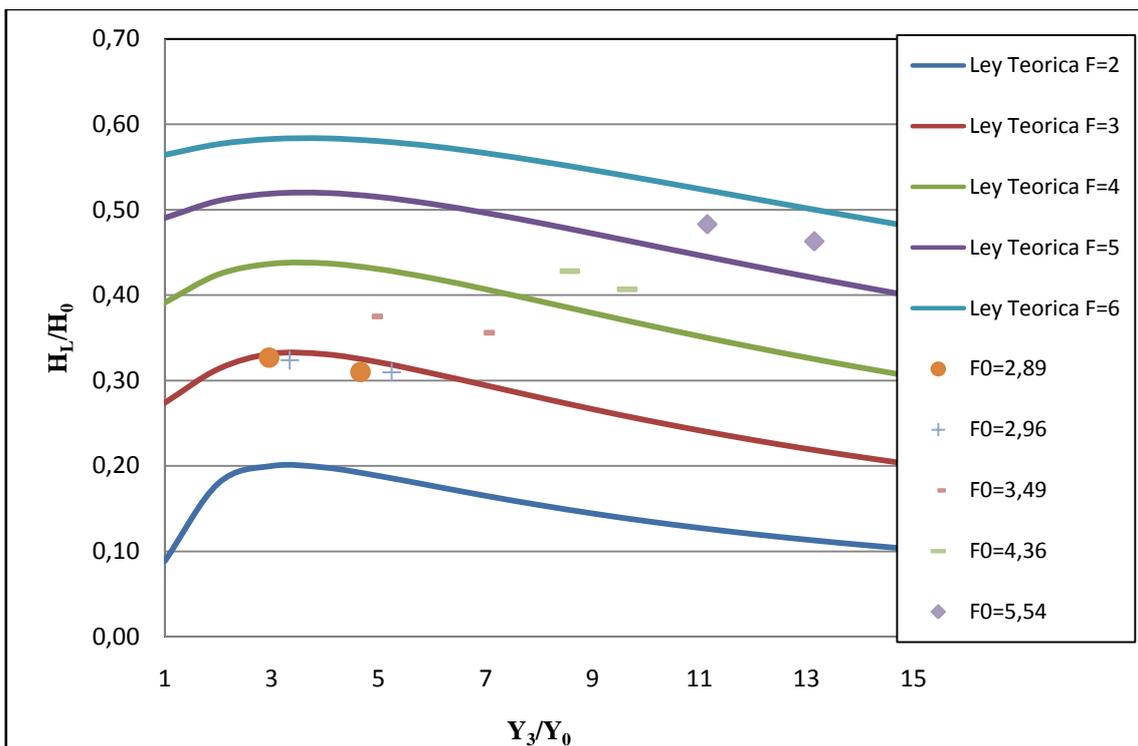


Figura. 2.11. Pérdida de energía relativa en resaltos sumergidos: $H_L/H_0 = f\left(\frac{y_3}{y_0}, F_0\right)$

En esta figura se observa claramente que para valores menores de F_0 , la disipación de energía relativa es inferior que para F_0 mayores.

También se ha evaluado la disipación de energía en resaltos libres, utilizando valores de velocidad media, con la siguiente expresión clásica:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (2.11)$$

Las siguientes expresiones se utilizaron para calcular la disipación de energía:

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right) \times 100 \quad (2.12)$$

para el caso de los resaltos libres.

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_4}{H_0}\right) \times 100 \quad (2.13)$$

para el caso de los resaltos sumergidos.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2.12 y 2.13:

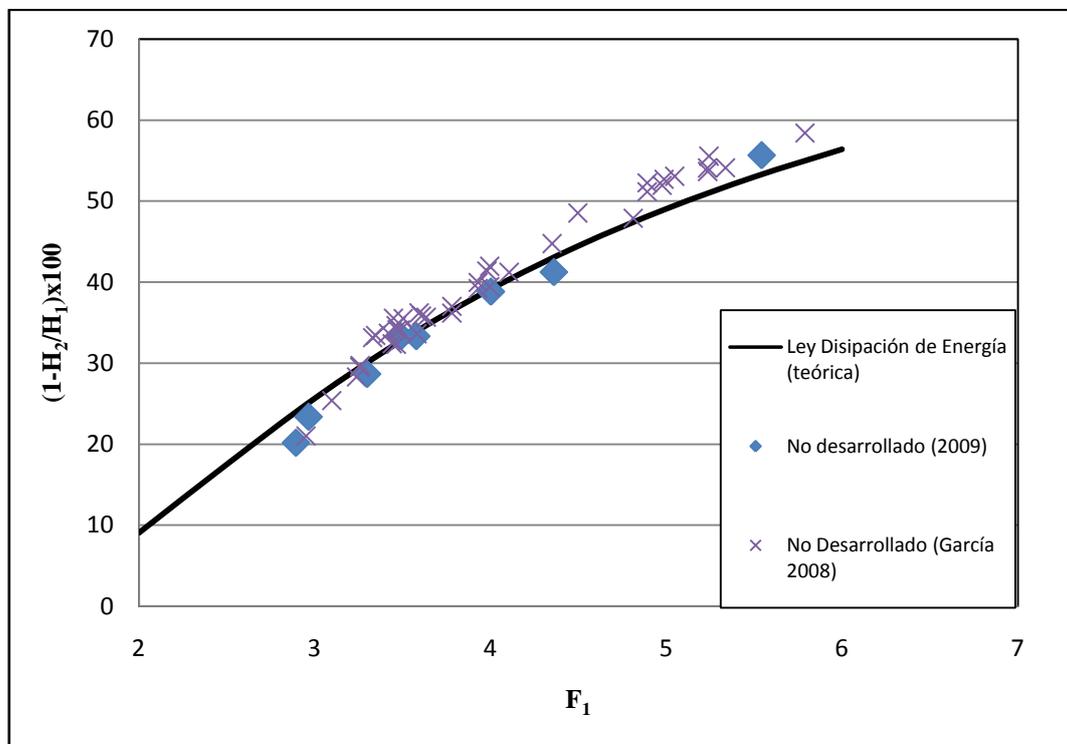


Figura 2.12. Disipación de energía en resaltos libres para velocidades medias.

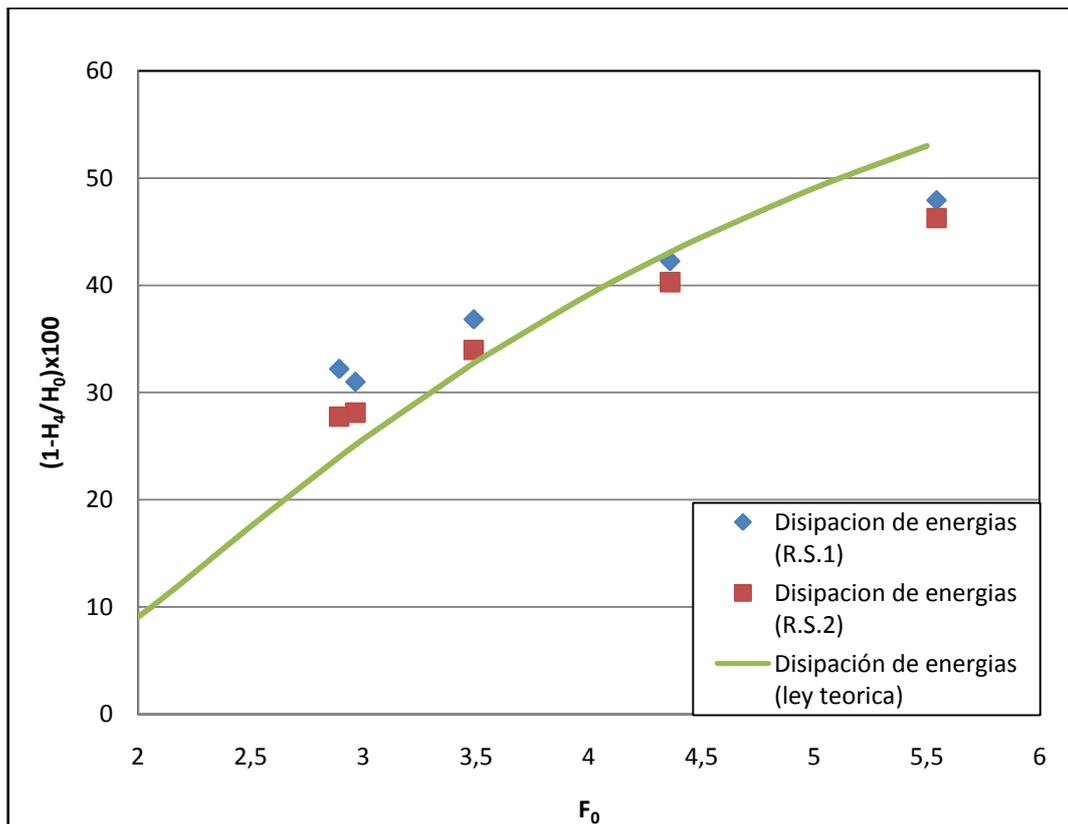


Figura 2.13. Disipación de energía en resaltos sumergidos para velocidades medias.

Como se observa en las figuras 2.13 y 2.14 existe un buen acorde entre las disipaciones de energía para velocidades medias en los resaltos libres, y no tan buena en los sumergidos, y los correspondientes valores teóricos. Comparando ambas figuras se observa que la disipación de energía para resaltos sumergidos es ligeramente superior al caso de los resaltos libres.

Por último se ha evaluado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos debida únicamente a la reducción de velocidades máximas entre la sección inicial del resalto ($x=0$) y la sección final del mismo donde $x=L_j$. Se han utilizado las siguientes expresiones:

% reducción de velocidad máxima experimental

$$\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \times 100 \tag{2.14}$$

para el caso de resaltos libres

% reducción de velocidad máxima experimental

$$\left(1 - \frac{v_4}{v_0}\right) \times 100 \tag{2.15}$$

para el caso de resaltos sumergidos

Los resultados obtenidos para los resaltos libres y sumergidos se muestran en las figuras 2.14 y 2.15 respectivamente:

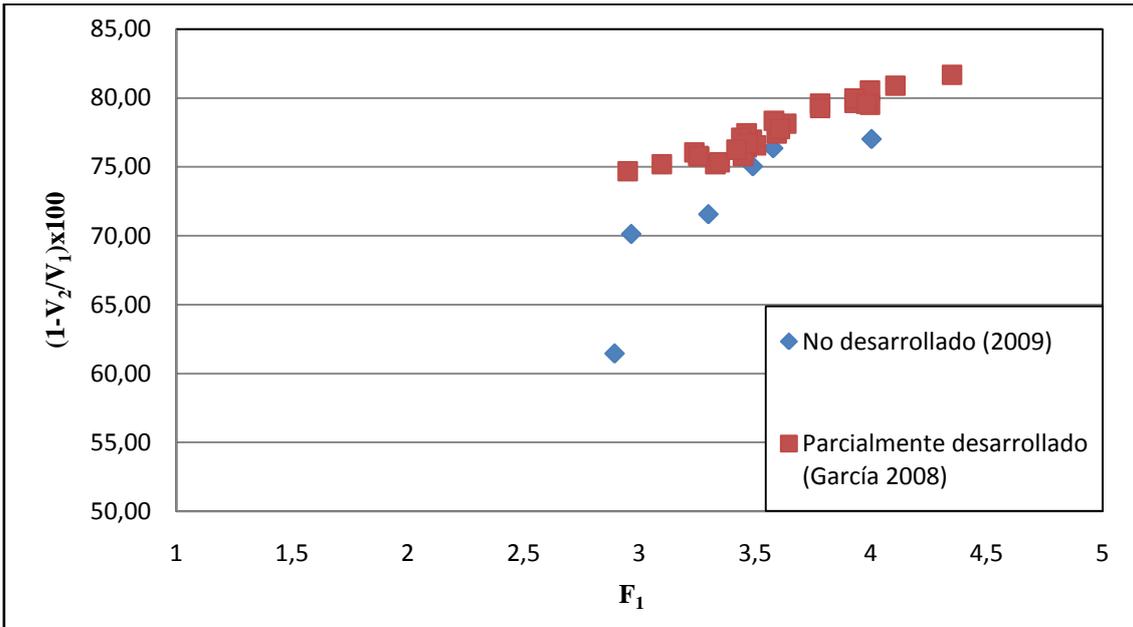


Figura 2.14. Reducción de velocidades máximas en resaltos libres.

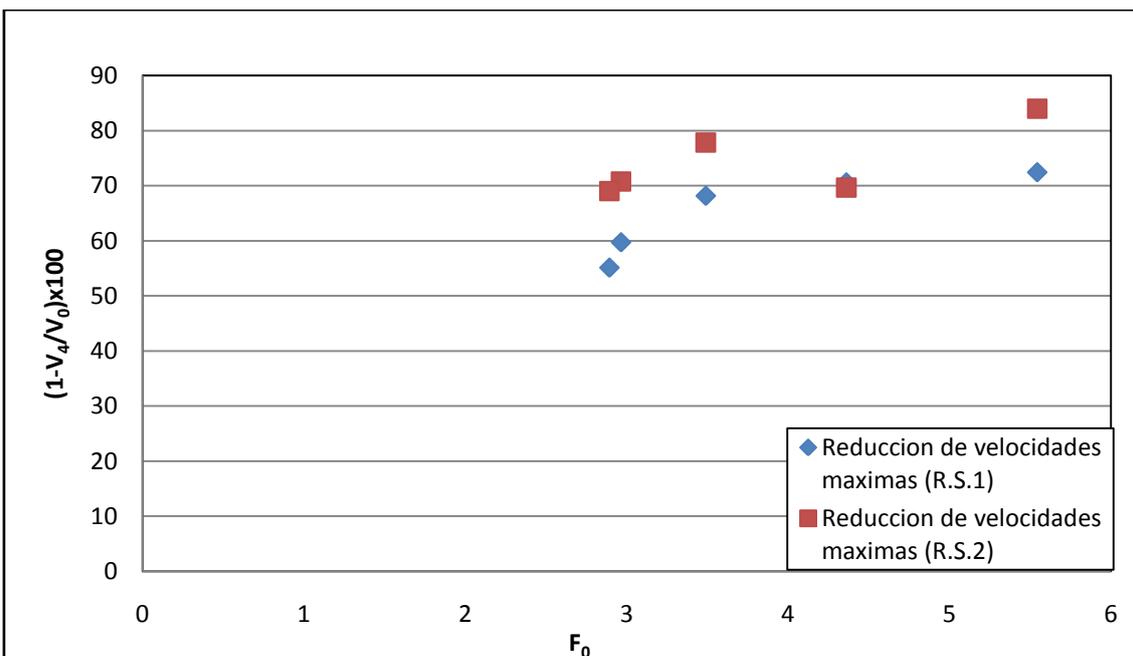


Figura 2.15. Reducción de velocidades máximas en resaltos sumergidos.

Con los pocos datos que tenemos podemos llegar a algunas conclusiones, como que en los resaltos sumergidos la disipación de energía debida únicamente a la reducción de velocidades máximas es mayor que para los resaltos libres, por lo cual llegamos a la conclusión de que las pérdidas de energía son mayores en los resaltos sumergidos que en los libres en el caso del aliviadero.

- **Longitud del resalto hidráulico**

- Resaltos hidráulicos libres

En la figura 2.16 se representan nuestros resultados experimentales junto con las siguientes ecuaciones obtenidas por Ohtsu et Al. (1990):

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,40; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (2.16)$$

$$\log_{10} \frac{L_j}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,58; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \text{ y } (0,14 \leq H_L/H_1 \leq 0,71) \quad (2.17)$$

$$\log_{10} \frac{L_t}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,72; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (2.18)$$

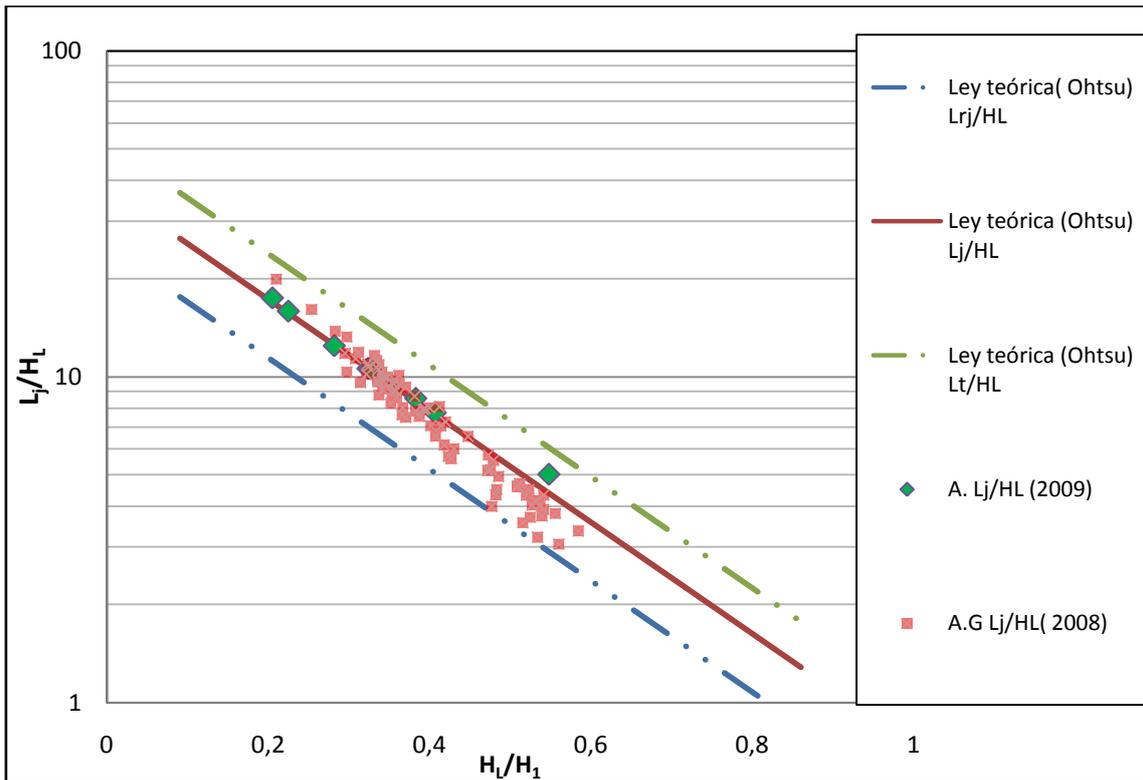


Figura 2.16. Relación entre L_j/H_L y H_L/H_1

Como se puede observar en la figura 2.16, los resultados obtenidos siguen la ley teórica de Ohtsu de L_j/H_L , por lo cual podemos decir que la longitud de resalto considerada es correcta para el caso del resalto libre.

- Resaltos hidráulicos sumergidos

En la figura 2.17 se representan nuestros resultados experimentales junto con las siguientes ecuaciones:

$$\log_{10} \frac{L_{sj}}{H_L} = -1.71 \frac{H_L}{H_0} + 1.58, \text{ para } (2,3 \leq F_0 \leq 10) \text{ y } (1 \leq y_3/y_0 \leq 20) \quad (2.19)$$

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1.71 \frac{H_L}{H_0} + 1.40 \quad (2.20)$$

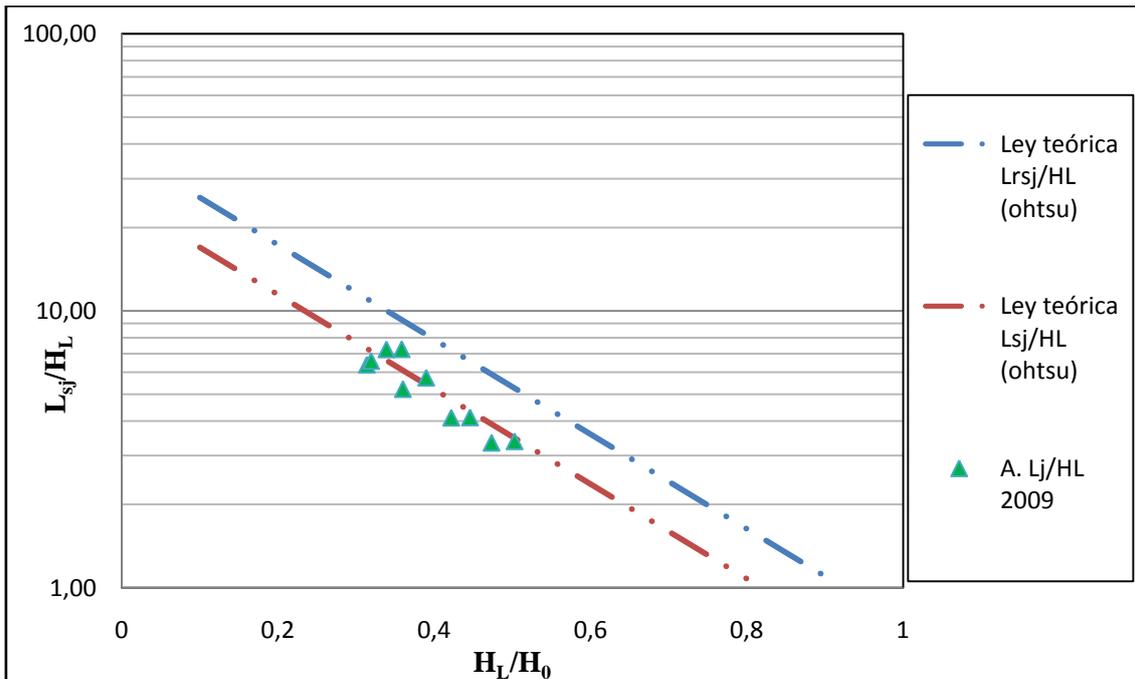


Fig.2.17. Relación entre L_{sj}/H_L y H_L/H_0 en resaltos sumergidos

La nube de puntos experimentales sigue la ley teórica de la longitud del rulo del resalto sumergido. Ello es debido a que la longitud que hemos utilizado para analizar los resaltos sumergidos no es la longitud verdadera del resalto sumergido, sino que es la misma longitud que la del resalto libre con el mismo caudal. Con esto podemos comprobar que dicha longitud está subestimando a la verdadera notablemente. Como se dijo anteriormente, este criterio fue escogido para comparar el comportamiento del flujo en las mismas secciones tanto en resaltos libres como en sumergidos.

- **Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos**

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución semejante de velocidades independiente de F_l y x , dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$:

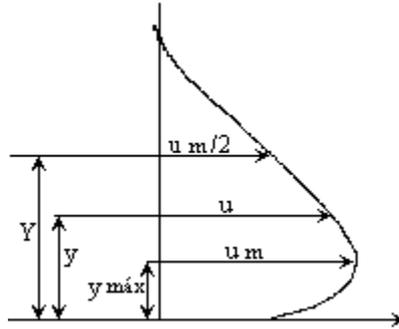


Figura 2.18. Definición esquemática de Y y $y_{m\acute{a}x}$. (Márquez, 2006)

Esta distribución de velocidad se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left(\frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad (2.21)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left(\frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5 \quad (2.22)$$

donde

$$k = y_{m\acute{a}x} / Y$$

A continuación se resumen los coeficientes k y n para las ecuaciones anteriores en la Tabla 2; y se representan las leyes teóricas aportando los valores teóricos de Ohtsu para el caso de flujo no desarrollado. Y aportando valores teóricos negativos de Hagen & Vischer (1995) de velocidades máximas negativas ubicados en la superficie del resalto. En la misma figura se representan también nuestros resultados experimentales para resaltos libres y para todos los valores de Froude:

Distribución de Velocidad	K	n
Resalto libre y sumergido UPCT $2,5 \leq Fr \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$ $4 \leq y_4/y_0 \leq 10$	0.342	9.5
Resalto libre (caso "a") Ohtsu et Al. $5 \leq Fr \leq 7,3$ $0,2 \leq x/L_{jc} \leq 0,7$	0.333	12

Tabla 2. Resumen de ecuaciones de distribución de velocidades.

Añadimos unos puntos teóricos siguiendo la formulación de Hagen & Vischer (1995) de velocidades máximas negativas para los puntos ubicados en la superficie del resalto.

Por medio de la ecuación 6.47 y la ecuación 6.48 y adimensionando.

$$u_s = U_s V_2 \quad (2.23)$$

$$U_s = -\text{seno} \left(\frac{x+0.1}{0.35} \right) \quad (2.24)$$

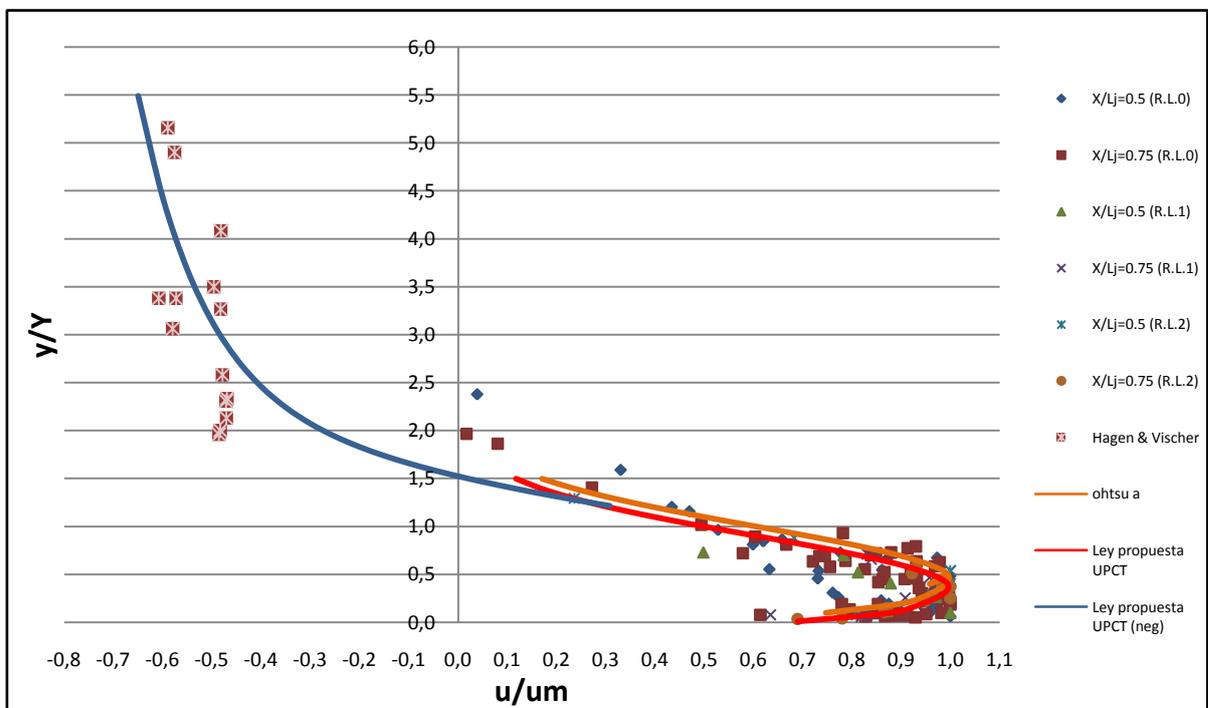


Figura 2.19. Distribución de velocidades para resalto hidráulico libre.

Resaltos hidráulicos sumergidos.

Los datos experimentales se explican por la ecuación de resalto libre si $y_4/y_0 \rightarrow y_2/y_0$.

$$\frac{u}{um} = 1,48 \eta^{\frac{1}{7}} [1 - \text{erf}(0.68 \eta)] \quad (2.25)$$

donde:

$$\eta = \frac{y}{Y}, \text{ siendo } Y \text{ la distancia perpendicular a la solera, en la que } u = \frac{um}{2}$$

La función error es la función primitiva de la distribución de gauss o normal:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.26)$$

Esta función la hemos acotado para $x=0.68\eta$ para su límite inferior y 0 para su límite superior.

Para los datos utilizados tenemos datos donde la relación y_4/y_0 es grande para aplicar la ecuación anterior; y otros en los que se asemeja a y_2/y_0 y aplicamos la ley del resalto sumergidos junto resaltos libres.

Para nuestro caso tenemos resaltos donde la relación y_4/y_0 es grande. Por este motivo hemos representado los resaltos sumergidos separados de los resaltos libres.

Para la parte negativa de los resaltos sumergidos realizamos un ajuste ya que al graficarlos, nos daban una tendencia diferente a la de los resaltos hidráulicos libres.

Para el aliviadero tenemos la ecuación siguiente

$$\frac{y}{Y} = e^{-6.116 \frac{u}{um}} + 1.1 \quad (2.27)$$

Este ajuste se representa en la figura 2.20.

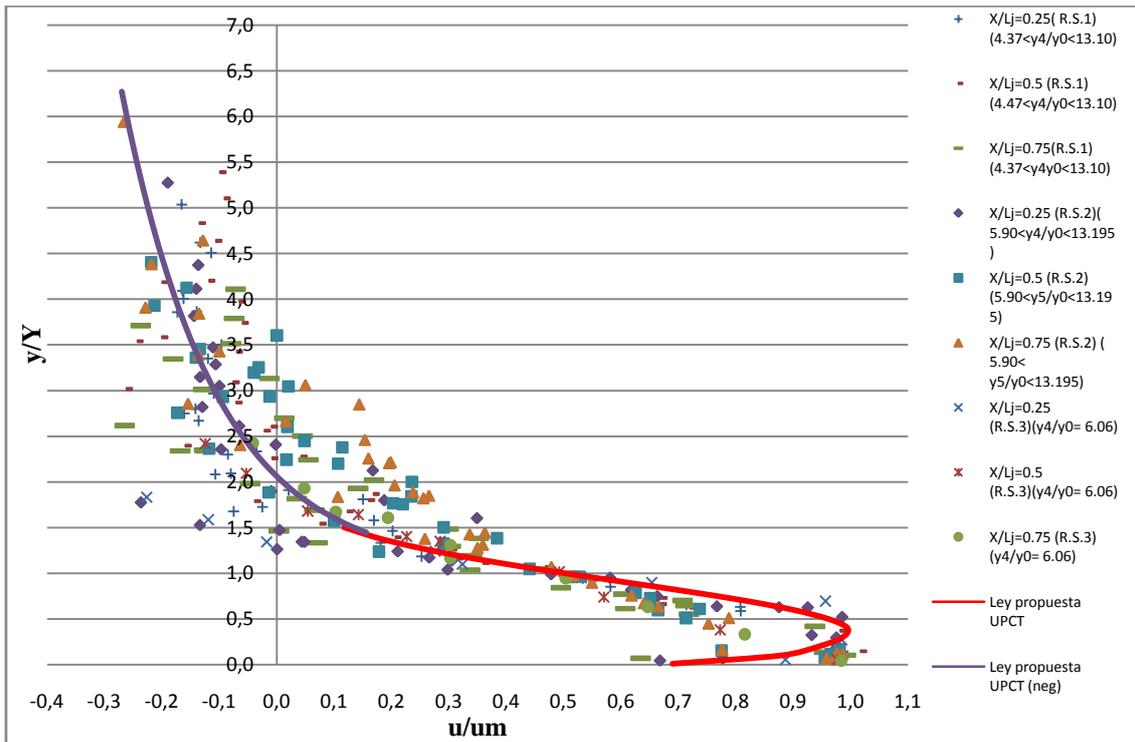


Figura 2.20. Distribucion de velocidades para resalto hidraulico sumergido.

En resumen, los ajustes obtenidos son los siguientes para resaltos libres y para resaltos sumergidos, respectivamente:

$$\frac{y}{Y} = a e^{-b \frac{u}{um}} + c e^{-d \frac{u}{um}}, 0,1 < \frac{u}{um} \leq 0,6 \quad (2.28)$$

$$\frac{y}{Y} = f e^{-g \frac{u}{um}} + h, 0,1 < \frac{u}{um} \leq 0,3 \quad (2.29)$$

Distribución de velocidades negativas	a ó f	b ó g	c ó h	d
Resalto libre	1.5	0.7	0.0224	7.46
Resalto sumergido	1	6.116	1.1	

Tabla 3. Resumen de coeficientes de las ecuaciones de distribución de velocidades negativas.

- **Descomposición frecuencial de la turbulencia de las series de velocidades.**

El análisis de las frecuencias de los procesos estocásticos, se fundamenta en el concepto de la transformación de Fourier. Basados en esto, para realizar la descomposición frecuencial de la series de velocidades, hemos utilizado el algoritmo de la *transformada discreta de Fourier (DFT)* por ser nuestras muestras de parámetro discreto, y concretamente la variante de la *transformada rápida de Fourier (FFT)*.

En la práctica, las señales se presentan muestreadas a intervalos de tiempo constante, T , para permitir su posterior tratamiento en un ordenador. En tal caso se obtiene una sucesión numérica producida por el muestreo de $x(t)$:

$$\dots, x_0 = x(0), x_1 = x(T), \dots \dots x_n = x(nT), \dots$$

Conviene en ese caso utilizar el concepto de *transformada discreta de Fourier (DFT)* $\tilde{X}(\omega)$, definida de la siguiente forma:

$$\tilde{X}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{-i\omega nT} \quad (2.30)$$

Donde: $\omega \in [-\omega_c, \omega_c]$; $\omega_c = \frac{\pi}{T}$

Y su transformada inversa:

$$x_n = \frac{T}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \tilde{X}(\omega) e^{i\omega nT} d\omega \quad (2.31)$$

Como en nuestro caso estamos utilizando las frecuencias, el par de *transformadas de Fourier*, en función de la frecuencia en (Hz), vienen definidas por:

$$\tilde{X}(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{-i2\pi f nT} \quad (2.32)$$

Y su transformada inversa:

$$x_n = T \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \tilde{X}(f) e^{i2\pi f nT} df \quad (2.33)$$

Aplicando dichos algoritmos, pero en la variante de la *transformada rápida de Fourier (FFT)* que es la variante que es capaz de calcular cualquier PC convencional con la

herramienta de *Excel*, hemos descompuesto las velocidades fluctuantes en los ejes X e Y (V_x' , V_y'), y la cortante entre ambas ($V_x'V_y'$).

$$V_{xi}' = V_{xi} - \bar{V}_x \quad (2.34)$$

$$V_{yi}' = V_{yi} - \bar{V}_y \quad (2.35)$$

siendo

V_{xi} la velocidad en el eje X en el instante i

V_{yi} la velocidad en el eje Y en el instante i

A dichas velocidades fluctuantes les haremos el *análisis de Fourier* y serán las que centren nuestro estudio.

La *FFT* se caracteriza porque se debe construir con un número de muestras igual a una potencia de dos (2^n).

Las funciones son calculadas con un intervalo de tiempo entre medida y medida que es función de la frecuencia en Hz, $T=1/f$, siendo f la frecuencia de la medición en Hz.

Una vez hecha la *FFT* se graficarán los espectros obtenidos. Para realizar estos gráficos sólo utilizamos los $N/2+1$ primeros datos, ya que según el teorema del muestreo de Nyquist, para una frecuencia dada, los datos obtenidos para la primera mitad de la frecuencia $f/2$ son simétricos a los de la otra mitad de la frecuencia.

Una vez descompuestas y graficadas las series elegidas, nos basamos en el concepto de Kolmogoroff (1941) para analizar dichos espectros.

El análisis lo haremos para frecuencias de 5Hz , 25Hz y 50Hz para hacer comparaciones.

El caudal utilizado ha sido el $Q_{caudalimetro}=8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ y hemos tomado como puntos de referencia los siguientes:

- Un punto en la sección 3, dentro del resalto, a una distancia de la solera entre 0.35 y 0.55 cm. Se tomarán medidas a 5, 25 y 50 Hz tanto en el resalto libre como en el resalto sumergido en el mismo punto.
- Otro punto en la sección 5, fuera del resalto, a una distancia de la solera entre 0.35 y 0.55 cm. Se tomarán medidas a 5, 25 y 50 Hz tanto en el resalto libre como en el resalto sumergido en el mismo punto.

En total tenemos 12 series de velocidades para descomponerlas frecuentemente, analizarlas y compararlas.

El resultado de dichos análisis y comparaciones se resume en las siguientes figuras 2.21, 2.22 y 2.23.

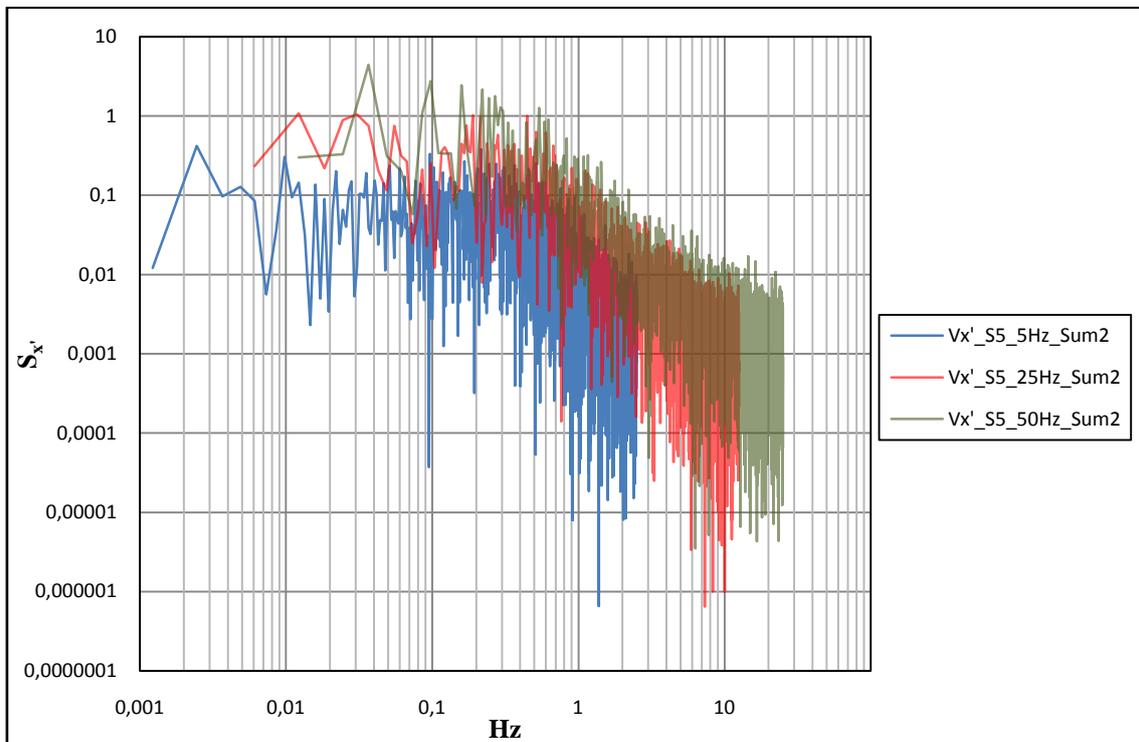


Figura 2.21. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

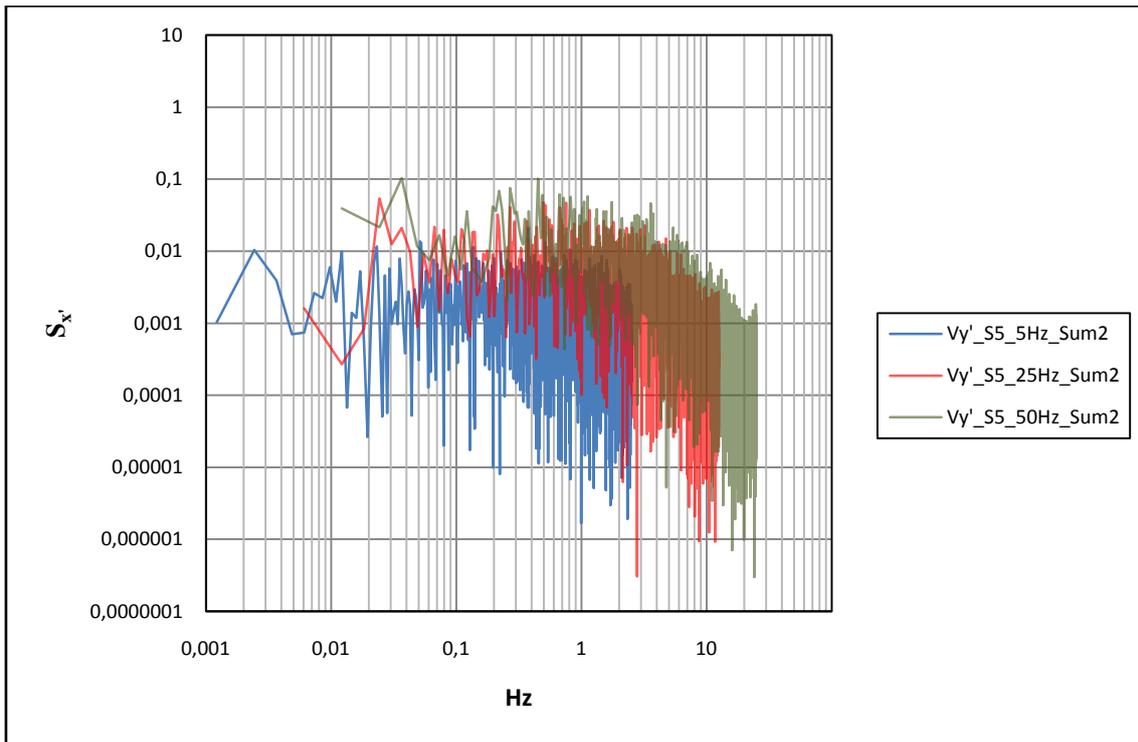


Figura 2.22. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante Vy' en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

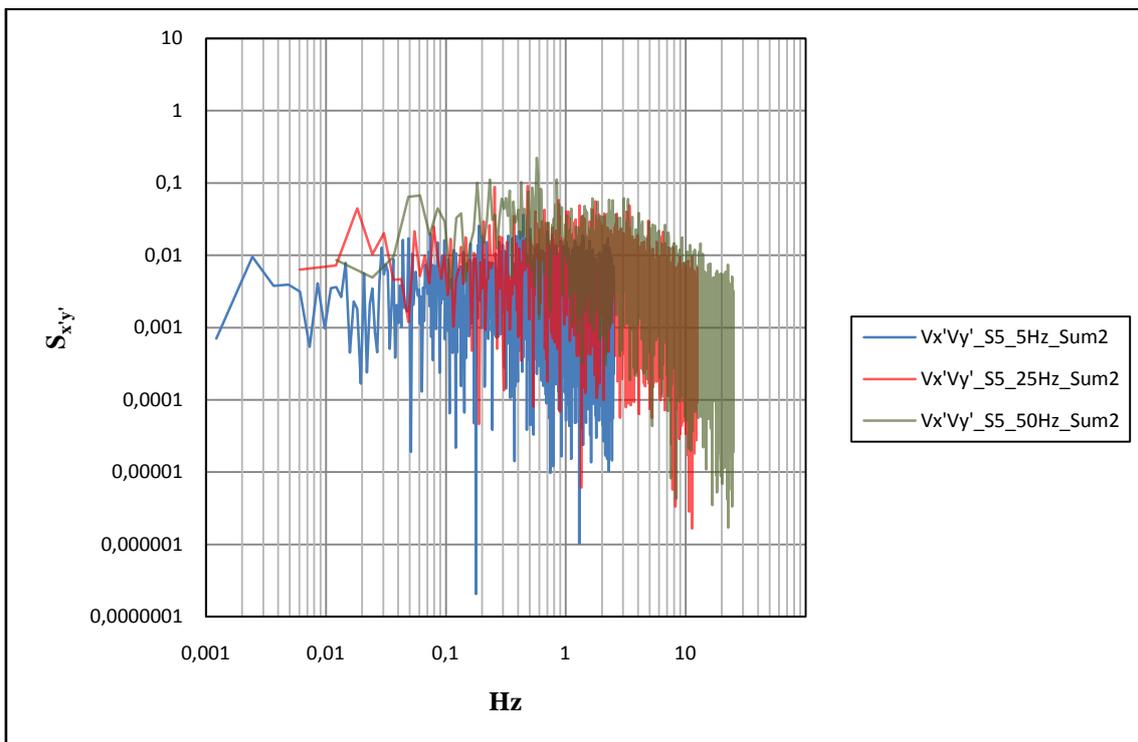


Figura 2.23. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $Vx'Vy'$ en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

Siendo S la densidad espectral.

Observamos que en todas ellas se cumple que la densidad espectral a 5Hz es menor que a 25Hz , y ésta menor que a 50Hz . O lo que es lo mismo, que cuanto mayor frecuencia de muestreo estemos utilizando, mayor energía será captada.

También se concluye que la componente con peores características de ruido es la V_y' , siendo la V_x' la que menos influenciada se ve por el ruido.

Otra cosa que se observa es que el ruido afecta menos conforme la frecuencia de muestreo aumenta, y también conforme la sumergencia aumenta. Se explica porque cuanto más frecuencia de muestreo utilizamos, mayor número de datos captamos por unidad de tiempo, entonces captamos mayor número de señales de turbulencia, al tener dichas turbulencias frecuencias elevadas con respecto al ruido. Por eso los muestreos a 50 Hz siguen mejor la ley de Kolmogoroff (1941) que a 5 Hz y a 25 Hz .

La forma en la que siguen la ley de Kolmogoroff (1941) es en todos los casos muy similar en cuanto a rangos se refiere, pero no en cuanto a calidad, ya que se puede ver que hasta frecuencias de 0.1 a 0.6 Hz los espectros suelen seguir una horizontal, coincidiendo con lo descrito en la ley de Kolmogoroff (1941) y perteneciendo la mayor parte de la señal al subrango de producción de bajas frecuencias, siendo la mayor parte de la señal ruido blanco. Luego, a partir de dichas frecuencias y en adelante los espectros tienden a ganar pendiente, llegando, en los mejores casos (por ejemplo frecuencia de muestreo 50 Hz en la sección 5), a ser como el subrango de inercia descrito por Kolmogoroff (1941) de $-5/3$.

También se observa un mejor ajuste a dicha ley en las series tomadas en la Sección 5 de estudio que los de la sección 3, ya que la sección 5, al estar fuera del resalto, tiene menor turbulencia y menor agitación, por lo cual el ruido es menor.

Hay que mencionar que en las secciones 3 hay más energía que en las 5, ya que dentro del resalto la energía es mayor que al final del resalto porque todavía no se ha disipado del todo.

En cuanto a las comparaciones de las distintas frecuencias de muestreo en función de sus parámetros estadísticos, se adjunta la siguiente tabla con las desviaciones estándar (RMS) de V_x' , V_y' y $V_x'V_y'$ y las medias de las velocidades V_x y V_y de la serie de velocidades.

Hz	Sección	\bar{V}_x	\bar{V}_y	RMS [V_x']	RMS [$V_x'V_y'$]	RMS [V_y']
5	S3 Libre	52,83	4,45	15,23	6,32	4,16
	S3 Sum2	52,96	0,92	7,40	2,79	1,69
	S5 Libre	30,50	0,47	3,58	1,75	1,42
	S5 Sum2	23,10	0,82	6,18	2,58	1,74
25	S3 Libre	54,08	4,39	20,72	9,74	7,35
	S3 Sum2	51,09	0,79	8,75	4,21	3,35
	S5 Libre	30,94	0,42	4,58	2,45	2,16
	S5 Sum2	23,18	0,89	6,41	3,02	2,31
50	S3 Libre	52,97	4,26	22,95	11,09	8,56
	S3 Sum2	49,75	0,71	9,18	4,65	3,78
	S5 Libre	31,51	0,50	5,03	2,72	2,42
	S5 Sum2	21,48	0,63	7,03	3,27	2,47

Tabla 4. Parámetros estadísticos de la turbulencia.

Comparando estos datos con los análisis de los espectros de energía podemos sacar en conclusión que cuanto más velocidad tiene el flujo, mayor ruido es captado por la sonda. Por eso, el ruido iba aumentando en las distintas secciones, siendo la sección 3 del resalto libre la más ruidosa y la sección 5 del resalto sumergido la que menos ruido tiene.

También se observa que la frecuencia de muestreo no altera las velocidades medias de manera notable, quedando estas velocidades con medias muy parecidas.

Sin embargo las desviaciones estándar (o raíz cuadrática media) si se ven muy alteradas con los cambios de frecuencias, teniendo mayores desviaciones con mayores frecuencias:

$$\text{RMS } [V_x'] \text{ a } 50\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'] \text{ a } 25\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'] \text{ a } 5\text{Hz}$$

$$\text{RMS } [V_y'] \text{ a } 50\text{Hz} > \text{RMS } [V_y'] \text{ a } 25\text{Hz} > \text{RMS } [V_y'] \text{ a } 5\text{Hz}$$

$$\text{RMS } [V_x'V_y'] \text{ a } 50\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'V_y'] \text{ a } 25\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'V_y'] \text{ a } 5\text{Hz}.$$

3. TRABAJO EXPERIMENTAL Y FILTRADO DE DATOS

3.1. Trabajo de laboratorio

Descripción de los componentes del canal

El canal utilizado para este proyecto consta de dos soportes los cuales permiten la nivelación del canal, un depósito de almacenamiento de agua, una bomba centrífuga, una compuerta aguas abajo y unos tranquilizadores de flujo.

- Soportes del canal: aparte de la función estructural del canal permite la nivelación del mismo. El canal presenta un defecto de forma en su parte final que se presenta de forma arqueada, lo cual no afecta a la zona de trabajo apreciable en el parte izquierda de la fotografía. En trabajos anteriores se incluyeron dos soportes adicionales para corregir este problema (véase Figura 3.1).



Figura 3.1. Canal de laboratorio (Márquez, 2006).

- Deposito de almacenamiento: contiene el agua que recircula por el canal.
- Bomba de agua: permite recircular el agua a distintos caudales gracias a una válvula de control.

- Compuerta: permite controlar el caudal de aguas abajo, con lo que podemos obtener resaltos a distintos desplazamientos.
- Tranquilizadores de flujo: evitan la excesiva oscilación de las ondas a lo largo del canal y que estas oscilaciones influyan en la aspiración de la bomba produciendo resaltos oscilantes.
- Aliviadero: el azud utilizado en este trabajo presenta un aliviadero con perfil tipo WES tallado en metacrilato. Su altura es de 14,8 cm desde la base. La situación del aliviadero es de 73 cm aguas abajo de la salida del depósito tranquilizador del principio del canal.



Figura 3.2. Aliviadero utilizado como estructura de control.

Aforo inicial

A partir de proyectos previos realizados en el canal de estudio se conocía la existencia de un error en el muestreo del caudalímetro analógico del que dispone el canal.

Los caudales que marca el caudalímetro cuando ponemos en marcha la bomba, no son los correctos, tendremos que ajustarlos a los reales. Para ello, marcaremos en el caudalímetro los distintos caudales de trabajo, y aforaremos el caudal, para compararlos y poder establecer una relación para nuestros futuros trabajos.

Por este motivo, se realizó un aforo volumétrico a distintos caudales para obtener un gráfico $Q_{real} - Q_{caudalímetro}$ que despejara todas las dudas respecto al caudal que realmente circula. Para ello se procedió al llenado de un recipiente de 22 litros, tomando el tiempo de la operación, para diversos caudales marcados con el caudalímetro.

De esta forma, se calculó, a partir del volumen de agua recogido en un determinado intervalo de tiempo, el caudal realmente trasegado en cada momento, con la ayuda de una probeta de 1000 mililitros, tal como se muestra en la fotografía, para cada uno de los caudales marcados por la bomba. Se realizaron tres mediciones y se obtuvo el valor promedio de las mismas.



Figura 3.3. Barreño y Probeta

Una vez obtenidos los caudales reales aforados y comparándolos con los que marca el caudalímetro, podemos conocer la relación que guardan mediante una recta de regresión.

Nos hemos basado en los datos obtenidos en el proyecto anterior (García, 2008; Vicente, 2008), muy similares a los nuestros, pero además hemos añadido un caudal de 2,5 m³/h , para tener un punto más con el que graficar la recta.

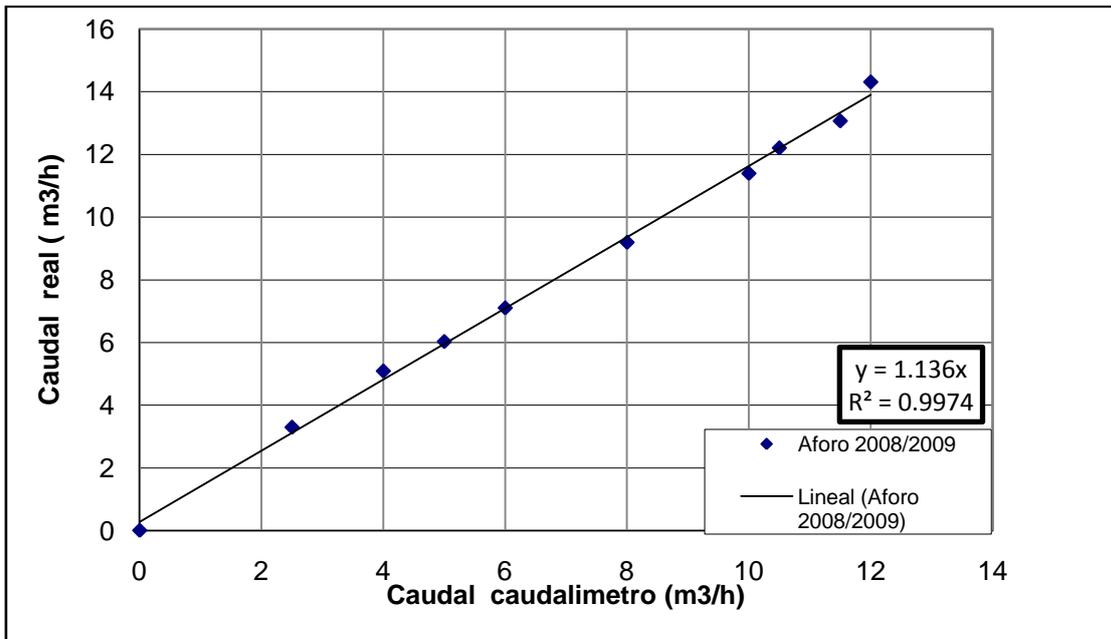


Figura 3.4. Corrección de caudales.

Q Caudalímetro	Q real
m ³ /h	m ³ /h
2.5	3.29
4	5.08
5	6.02
6	7.10
8	9.19
10	11.39
10.5	12.20
11.5	13.06
12	14.30

Tabla 5. Comparación de caudales

Obtenemos un ajuste por regresión lineal entre los valores:

$$Q_{\text{real}} = F_c * Q_{\text{Caudalímetro}}$$

Siendo F_c el factor de corrección, igual a 1.136.

Configuración de la sonda

Para la caracterización de los gradientes de velocidad en los distintos perfiles de los resaltos hidráulicos, se emplearon equipos acústicos Doppler de la casa SonTek/YSI (ADV) con medición de velocidad del flujo en 3D tomando como superficie de referencia la superficie del agua (hacia arriba); en 3D tomando como superficie de referencia la solera del canal (hacia abajo); y 2D, y también se utilizó el Velocímetro Acústico Doppler de Nortek ADV

Estos equipos han sido utilizados de forma similar en trabajos anteriores (Carrillo, 2004; Márquez, 2006).

- *Frecuencia de muestreo:* la toma de velocidades se realiza con una frecuencia de 5 Hz de esta manera se obtienen valores de velocidades más homogéneos.
- *Condiciones del agua:* para una mayor exactitud de las mediciones el agua ha de estar a una temperatura del orden de 20° C y una salinidad de 2ppt. Además se añade un aditivo suministrado junto con la sonda por el proveedor para garantizar la suspensión de partículas que se detecten al paso por el volumen de control de medida.
- *Rango de velocidad:* Uno de los parámetros más importantes del ADV es la configuración del rango de velocidad. Determina la velocidad máxima que puede ser medida por el instrumento. Las configuraciones del rango de velocidad estándares para la sonda 16/10 MHz ADVs son ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , y ± 250 cm/s. Por lo general, se debe escoger la configuración del rango de



velocidad más baja que cubra la velocidad máxima esperada en un ensayo dado. El ruido generado por el instrumento en los datos de velocidad es proporcional a la configuración de rango de velocidad; altos rangos de velocidad tienen niveles de ruido más altos.

La configuración del rango de velocidad son valores nominales; la máxima velocidad real depende de la dirección del flujo respecto la sonda. El ADV mide velocidades a lo largo del eje de biestático de cada receptor; las limitaciones de velocidad máximas se producen en las velocidades biestáticas. Puesto que los ejes biestáticos tienen una inclinación de 15° respecto al eje vertical de la sonda, el ADV es más sensible al flujo vertical, y tiene una velocidad máxima inferior para flujos verticales. Las tablas siguientes muestran las velocidades máximas que pueden medirse en cada rango de velocidad del ADV para flujos meramente verticales o meramente horizontales.

Rango de velocidad del ADV	Máxima velocidad horizontal	Máxima velocidad vertical
±3 cm/s	±30 cm/s	±8 cm/s
±10 cm/s	±60 cm/s	±15 cm/s
±30 cm/s	±120 cm/s	±30 cm/s
±100 cm/s	±300 cm/s	±75 cm/s
±250 cm/s	±360 cm/s	±90 cm/s

Pero estas velocidades máximas no son aplicables a nuestro caso, ya que por un lado, las condiciones de flujo turbulento de nuestro resalto, y por otro lado las reducidas dimensiones del canal, hacen que cuando se producían velocidades por encima de 100cm/s, por ejemplo, y nuestro rango era de ±100 cm/s, se producía un inverso en la señal dando valores negativos muy elevados debido a rebotes de las ondas.

Al operar en flujos altamente turbulentos, el ADV puede mostrar valores de correlación bajos que indican un aumento del ruido en las medidas de velocidad. En flujos turbulentos, el nivel de ruido puede reducirse aumentando el rango de velocidad. La magnitud de las fluctuaciones turbulentas puede aproximarse por la desviación estándar de los datos de velocidad mostrado por el software de

adquisición de datos del ADV. Si éstos son 5% o más de la configuración de rango de velocidad (por ejemplo, mayor que 5cm/s en el rango de velocidad ± 100 cm/s), el rendimiento se debe mejorar cambiando al rango de velocidad mayor más próximo. Este cambio debe aumentar el coeficiente de correlación y reducir el ruido en los datos de velocidad.

Con esta explicación llegamos a que para el correcto funcionamiento de la sonda es necesario introducir unos parámetros de entrada. Los más importantes son el rango de velocidad, cuyo valor establecido es de ± 100 cm/s para la mayoría de los casos y ± 250 cm/s para casos en los que la velocidad del flujo era demasiado alta y, debido a las características antes dichas, se producían rebotes de las ondas y con ello incorrectas mediciones. La frecuencia de muestreo fue de 5 Hz, aunque para el análisis de la turbulencia de las series medidas, mediante FFT (Fast Fourier Transform) utilizamos también frecuencias de 25Hz y de 50Hz. Otro parámetro fundamental es la salinidad, cuyo valor estimado fue de 2 ppt.

Equipo informático

Para la campaña de muestreo se utilizó un portátil acer aspire 1644 (figura 3.5) un conector USB-Serie con su correspondiente software y el equipo Doppler (figura 3.6).

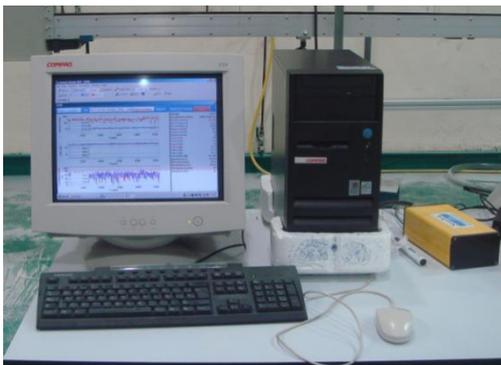


Figura 3.5. Ordenador.



Figura 3.6. Sonda y receptor ADV

Campaña de muestreo

Los parámetros obtenidos en el laboratorio son aquellos que definen un resalto hidráulico.

H : carga aguas arriba del azud

L_j : longitud del resalto hidráulico.

y_1 : calado contraído en flujo supercrítico.

y_2 : calado conjugado en la sección final del resalto hidráulico.

Para la medida de estos parámetros se utilizó un limnómetro diseñado por el fabricante para este canal. Se realizaron dos campañas de muestro geométrico (H, L_j, y_1, y_2) con la finalidad de obtener una nube de puntos más completa.

Se fijaron para cada uno de los caudales de trabajo, los siguientes resaltos:

Un resalto hidráulico libre en función de su desplazamiento, estabilizado al pie del aliviadero (R.L.0) y tres resaltos hidráulicos sumergidos, en función de la carga (H) aguas arriba del aliviadero: Uno cuya sumergencia era igual a la altura del aliviadero, 14.8 cm (R.S.1); otro cuya sumergencia era igual a la altura del aliviadero más $H/2$ (R.S.2); y un último para una sumergencia igual a la altura del aliviadero más $3H/2$ (R.S.3). Este último sólo pudo conseguirse para un caudal de caudalímetro de $12\text{m}^3/\text{h}$.

Resaltos sumergidos.

Para cada caudal, hemos tomado 3 sumergencias diferentes. Tomando 5 caudales iguales que para los resaltos libres.

El criterio de establecer cada sumergencia ha sido de la siguiente manera:

Primero, hemos tomado las variables del resalto libre para ese caudal, y a partir de estas, hayamos las longitudes del resalto (hemos tomado las mismas que en las de los libres, aunque en realidad deberían ser mayores), y hemos medido la carga " h " aguas arriba del aliviadero. Seguidamente calculamos las sumergencias de la siguiente manera.

Los datos requeridos del resalto libre son, la L_j (que es la longitud del resalto libre), y la H_{total} .

Ahora obtenemos la diferencia entre la altura del aliviadero y la H_{total} ($H_{total}, 14.8$), nombrando esta diferencia como h . Con todo esto, las tres sumergencias quedan de la siguiente manera:

1ª Sumergencia: 14,8

2ª Sumergencia: $14,8 + 1/2 * h$.

3ª Sumergencia: $14,8 + 2/3 h$. (no pudo llegar a hacerse en ningún caudal de trabajo, aunque en el $Q=12 \text{ m}^3/\text{h}$ se acercó mucho a este valor)

En la siguiente tabla se presentan los valores del caudal del caudalímetro, el caudal real, la L_j del resalto libre, la H_{total} , para los resaltos libres, y la h , que es la diferencia para cada caudal.

Q caudalímetro (m ³ /h)	Q real (m ³ /h)	H _{total} (cm)	h (cm)	L _j (cm)
4,5	5,38	19,40	4,6	47,22
5,5	6,52	20,05	5,25	46,43
8,5	9,92	20,80	6,60	52,67
10,5	12,20	21,40	6,50	53,03
12	13,90	22,30	7,50	56,65

Tabla 6. Caudales de los resaltos sumergidos

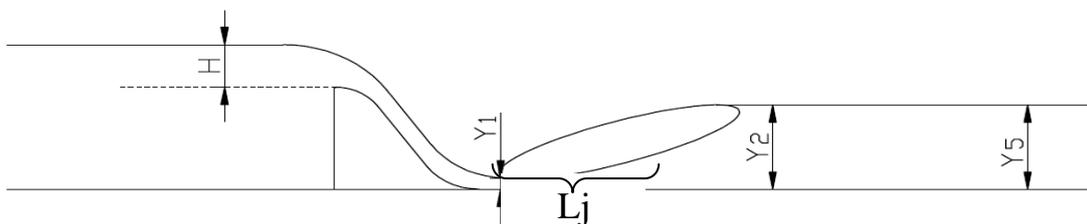


Figura 3.7. Resalto libre estabilizado al pie del aliviadero.

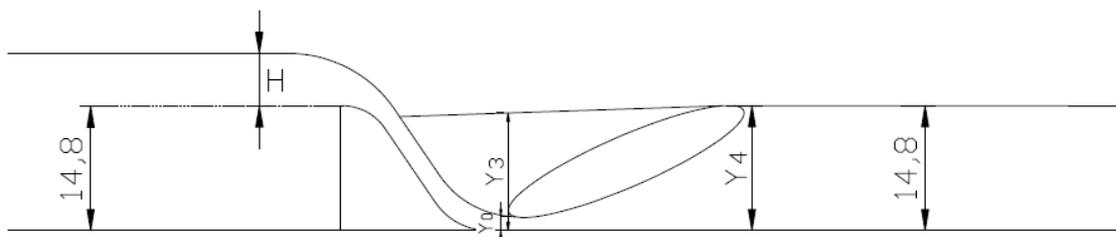


Figura 3.8. Resalto al pie del aliviadero sumergido a 14.8 cm

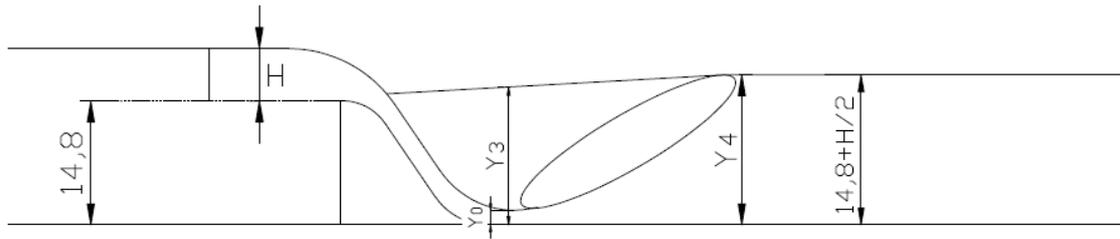


Figura 3.9. Resalto al pie del alviadero sumergido a 14.8cm + H/2

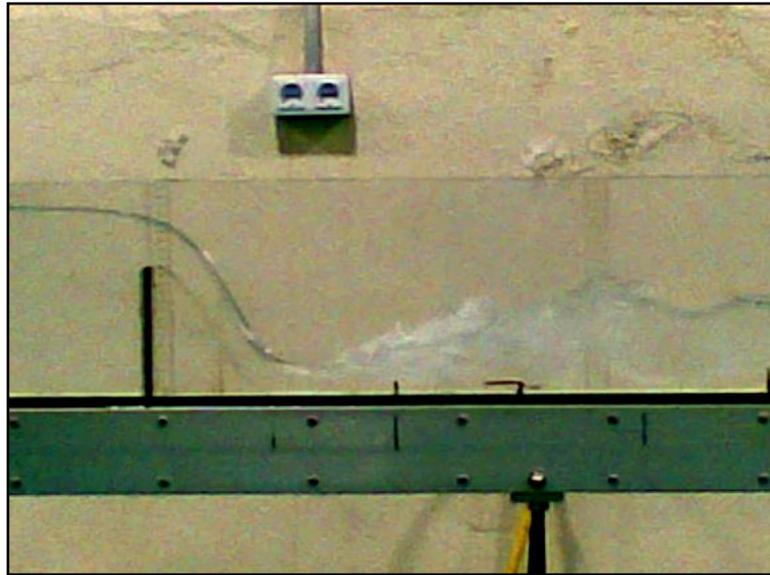


Figura 3.10. Resalto libre formado al pie del alviadero.



Figura 3.11. Resalto Sumergido

En cada uno de los resaltos se distinguieron seis secciones en las cuales se llevaron a cabo las mediciones con el equipo Doppler a distintas profundidades, para establecer el gradiente de velocidad en esa sección.

Sección 0. Localizada al inicio del resalto, al pie del aliviadero.

Sección 1. Localizada a un cuarto de la longitud del resalto hidráulico ($L_j/4$).

Sección 2. Localizada a la mitad del resalto hidráulico ($L_j/2$).

Sección 3. Localizada a tres cuartos de la longitud del resalto hidráulico ($3L_j/4$).

Sección 4. Localizada al final del resalto hidráulico (L_j)

Sección 5. Localizada a una distancia intermedia entre el final del resalto y el punto medio del canal.

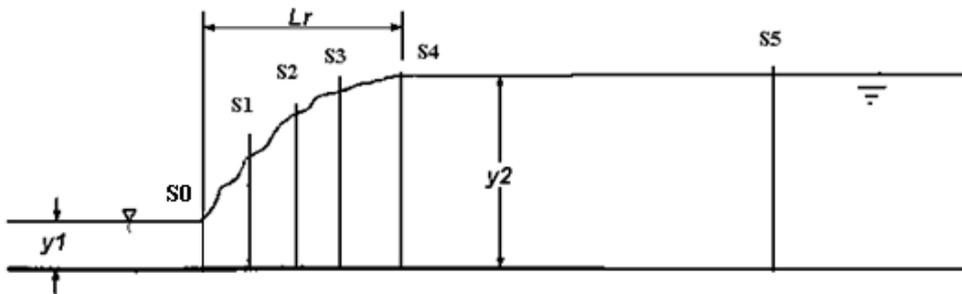


Figura 3.12. Distribución de las secciones en el resalto.

3.2. Filtrado de datos

El equipo de medida de velocidades instantáneas (ADV, Acoustic Doppler Velocimeter) necesita estar completamente sumergido para poder muestrear, puesto que el agua constituye el elemento fundamental de transmisión del sonido y como ya sabemos éste es el principio básico de funcionamiento del aparato.

En definitiva, se trata de un emisor que genera una onda que se propaga por el fluido y de unos receptores que miden las proyecciones de los vectores de velocidad de dicho fluido al recibir esa onda.

Por ello, es muy fiable en el muestreo de flujos laminares y turbulentos sin la presencia de aire. En el caso de resaltos hidráulicos estamos en un flujo altamente turbulento y la presencia de burbujas de aire atraviesa el volumen de muestreo interponiéndose a las ondas sónicas emitidas por el equipo y produciéndose así un error en la adquisición de la velocidad real.

En estas circunstancias es necesario verificar los registros y realizar un filtrado digital de la información, para eliminar y/o corregir los datos anómalos sin alterar la continuidad del registro.

Podríamos decir, que nuestro método de filtración de datos se basa en tres pasos principalmente:

- Detectar las series que presentan puntos anómalos (también llamados spikes).
- Aplicar un valor umbral de aceleración a la serie, previamente calculado. El cual establecerá el límite de aceleración máxima que la serie no podrá sobrepasar.
- Corte progresivo de los límites superior e inferior en los estadísticos 5% y 95%.

PROCEDIMIENTO (Castillo, 2009):

Cogemos la serie de datos de velocidad muestreados que vayan a ser nuestro objeto de estudio, en nuestro caso 4096 datos.

Calculamos la aceleración máxima que no podrá exceder la serie y que representará nuestro umbral de corte. Hemos observado que para el caso de resaltos hidráulicos el umbral λ_a debe ser obtenido en función del calado de la sección estudiada y su correspondiente número de Froude.

$$\alpha_j = \frac{u_j}{\Delta t} = \frac{Fr_j \sqrt{g \cdot y_j}}{\Delta t} \geq 0.5 g \quad (3.1)$$

g : La aceleración de la gravedad, 981 cm/s^2 .

Fr : El número de Froude teórico de la sección de muestreo.

y : El calado de la sección de muestreo

Δt : El intervalo del tiempo de muestreo, 0.2 s .

La elección para el calado y_j depende de si los puntos de muestreo se encuentran aguas abajo (siendo el calado y_{dj}) o si los puntos son de aguas arriba (siendo el calado y_{uj}) (Figura. 3.13). Según estos calados se calcula a_j .

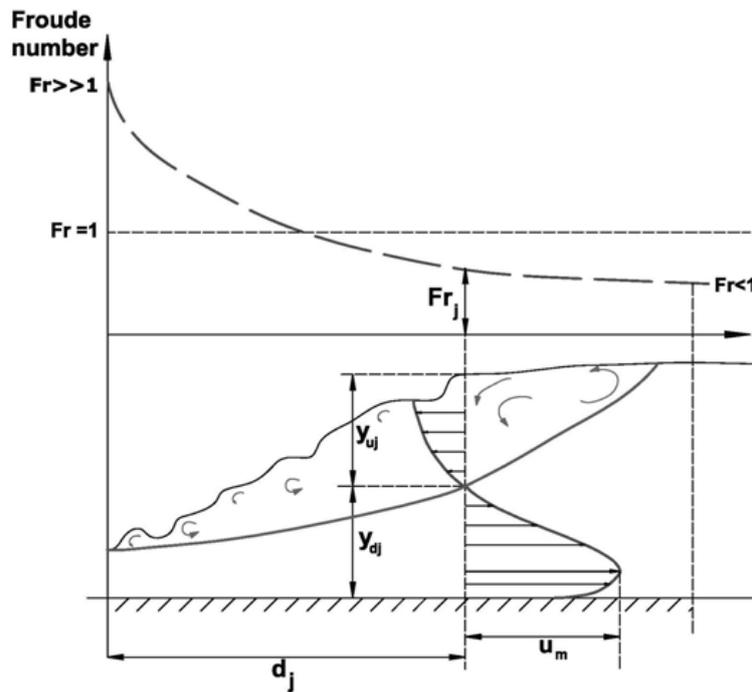


Figura 3.13 Variación del número de Froude y los principales parámetros dentro del resalto hidráulico. (Castillo, 2009).

Calculamos la aceleración de muestreo:

$$a = [(u_{i+1}) - (u_{i-1})] / \Delta t \quad (3.2)$$

donde u_i es la velocidad discreta de la serie de tiempo y Δt es el intervalo de muestreo.

Identificamos aquellos puntos que sobrepasan el umbral establecido y que tomaremos como anómalos (spikes): $|a| > a_{máx}$; siendo $|a|$ el valor absoluto de la aceleración de las velocidades discretas en el intervalo de tiempo muestreado. La consideramos en valor absoluto para actuar tanto en las aceleraciones positivas como en las negativas.

Reemplazamos los spikes. En los casos en que la aceleración sobrepasaba nuestro umbral establecido, consideramos oportuno, tras varios replanteos, que la opción que adoptaríamos sería sustituir la velocidad de muestreo u_i por la mediana de las velocidades discretas de la serie de datos cuyos valores anómalos habían sido sustituidos previamente por ceros.

Antes de continuar, debemos citar dos conclusiones a las que llegamos en este punto:

Para el final del resalto, la aceleración máxima de corte que establecemos no debería ser menor o igual a media gravedad, puesto que si no podríamos alterar la serie tomando puntos por spikes sin serlo.

El criterio de aceleración que adoptamos debería sería aconsejable repetirlo varias veces hasta la inexistencia de nuevos spikes tras el reemplazo, aunque para nuestro proyecto solo lo empleamos una vez.

Por último, aplicaremos el ***corte progresivo de los límites inferior y superior en función de los estadísticos 5% y el 95 % (Castillo, 2008)***: Una vez que tengamos la serie filtrada por aceleración pasaremos a la aplicación del filtrado estadístico si fuera necesario. Se pretende descartar las velocidades que no sigan una distribución normal.

Obtenemos la media de las velocidades filtradas en cada punto, llamada **Xmedia**.

Observamos el valor de velocidad máximo **Xmáx**.

Calculamos la diferencia entre ambas, que denominamos como **A1**:

$$A1 = X_{\text{máx}} - X_{\text{media}}$$

La diferencia entre la media **Xmedia** y **A1** nos dará **Xmín**.

Xmín = Xmedia - A1 que utilizaremos para el cálculo de la amplitud.

La amplitud es $A = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$.

Así adquiriremos los valores de corte superior **Xmáx,c** e inferior **Xmín,c** que utilizaremos para filtrar la serie finalmente.

Como ya hemos dicho con anterioridad, desecharemos los valores que se encuentren fuera de los estadísticos 5 y 95% de la distribución normal de la serie.

El valor de corte superior **Xmáx,c = Xmáx - (A*0.05)** se corresponde al percentil 95% y los valores de velocidad superiores a éste serán sustituidos por el valor de **Xmáx,c**.

El valor de corte inferior **Xmín,c = Xmín + (A*0.05)** se corresponde con el percentil 5% y pondrá límite a los valores de velocidad que sean menores a él, sustituyéndose en su caso por **Xmín,c**.

En definitiva, los valores de velocidad que sean mayores que $X_{m\acute{a}x,c}$ y menores que $X_{m\acute{i}n,c}$ se considerarán fuera de lo aceptable por nosotros y serán sustituidos por ambos respectivamente, obteniendo una serie limpia. Este método lo prefijamos para que se aplique repetidamente hasta que no detectemos más spikes. Se recomienda no hacer más de 1 ó 2 filtrados estadísticos para no alterar la serie original.

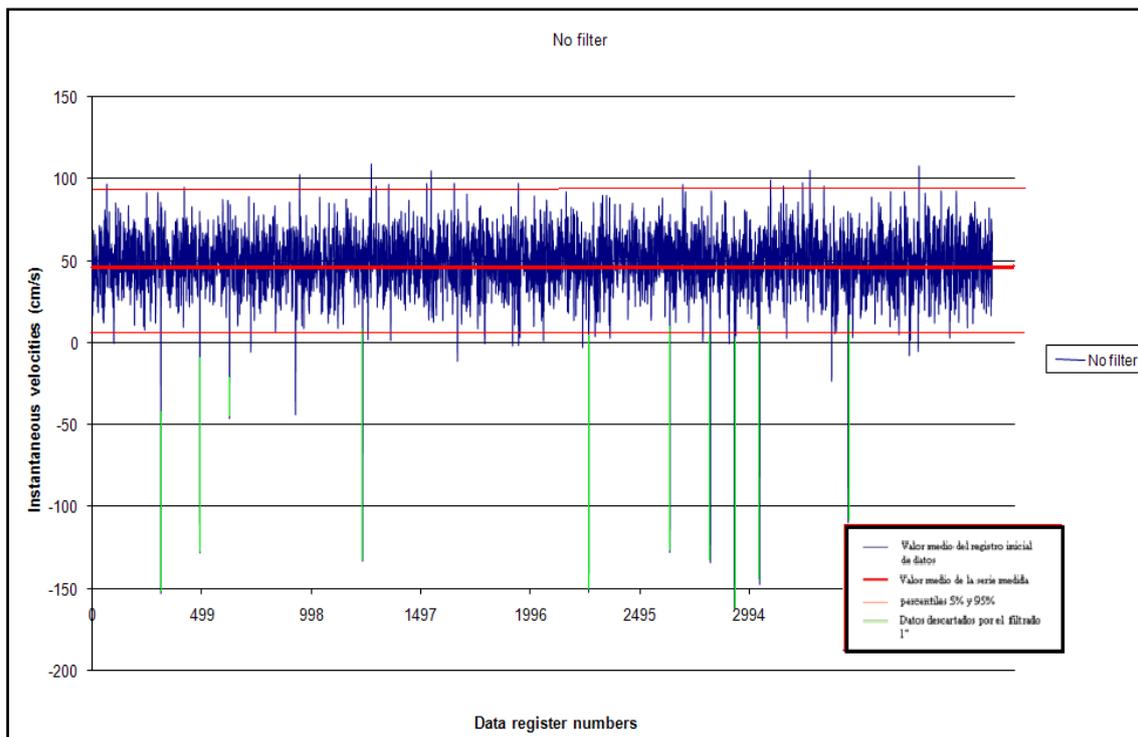


Figura 3.14 .Esquematización del funcionamiento del filtro estadístico.

ΔT (s)=	0.20												
F=	2.17	FILTRADO ESTADÍSTICO DE LA SEIRE FILTRADA POR ACELERACIÓN											
y (cm)=	5.17												
amáx (cm/s ²)=	772.13					1º Filtrado		2º Filtrado		3º Filtrado		4º Filtrado	
Sample	Vx_Original	Acel.	Vx_Filtr_Ace	L. superior	L. inferior								
1	29.36			53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52
2	53.52	120.8	53.52	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64
3	16.64	-184.4	16.64	47.59	47.59	47.59	47.59	47.59	47.59	47.59	47.59	47.59	47.59
4	47.59	154.75	47.59	30.86	30.86	30.86	30.86	30.86	30.86	30.86	30.86	30.86	30.86
5	30.86	-83.65	30.86	49.81	49.81	49.81	49.81	49.81	49.81	49.81	49.81	49.81	49.81
...
4096	67.06	200.75	67.06	55.97	55.97	55.97	55.97	55.97	55.97	55.97	55.97	55.97	55.97
	Mediana=		50.14		50.08		50.08		50.08		50.08		50.08
	Desv.Est.=		18.37		15.98		15.97		15.90		15.78		15.78
	Xmedia=		49.39		49.83		49.83		49.84		49.85		49.85
	Xmax=		109.36		109.36		103.41		98.05		93.23		93.23
	A1=		59.97		59.53		53.58		48.21		43.38		43.38
	Xmin=		-10.57		-9.70		-3.75		1.62		6.47		6.47
	A=		119.93		119.06		107.16		96.42		86.76		86.76
	A*0,05=		6.00		5.95		5.36		4.82		4.34		4.34
	Xmax c=		103.36		103.41		98.05		93.23		88.89		88.89
	Xmin c=		-4.58		-3.75		1.61		6.45		10.81		10.81

Figura 3.15. Resumen de la hoja de filtrado.

4. LIMITACIONES DEL EQUIPO

4.1. Sonda

La principal limitación de la sonda radica en las propiedades geométricas del sistema de adquisición de datos el cual exige un calado superior a 5 cm. Esto se debe a que el equipo Doppler necesita un rebote de la onda sobre el fondo del canal y de regreso ser captada por la sonda, a una distancia mínima de 5 cm en el caso de la sonda MicroADV de 16 Mhz.

Esta circunstancia no permite la medición de caudales bajos y calados inferiores a 5 cm.

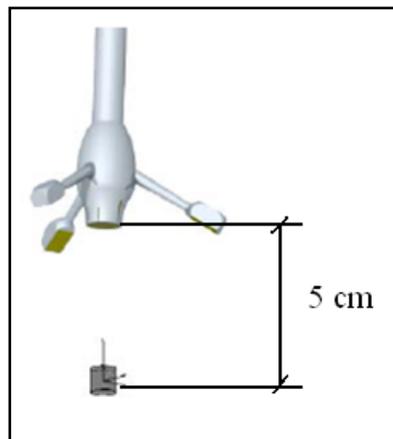


Figura 4.1. Umbral de medición del equipo ADV

4.2. Canal

Subsanados en trabajos anteriores todos los defectos de forma e influencia en el flujo, como las perturbaciones al inicio y fin del canal para las que se necesitan los tranquilizadores, la restricción impuesta por canal es la imposibilidad de alcanzar un mayor rango de Froude que en este trabajo se sitúa entre $2.89 < F_1 < 5.54$.

Otro importante factor limitante del canal se debe a los efectos de escala, los cuales proporcionan una adicional pérdida de energía adicional.

4.3. Hoja de Cálculo

Para casi todas las operaciones las hojas de cálculo de Excel han sido suficientes, pero en el caso del análisis de Fourier solo se pueden añadir 4096 datos, por lo cual para la frecuencia de muestreo de 5Hz no hay ningún problema, ya que una serie de 4096 datos muestreada a 5Hz es bastante representativa.

El problema llega cuando aumentamos a 25Hz y 50Hz, ya que a estas frecuencias de muestreo 4096 datos pueden no ser muy representativos de dichas series.

5. BASES TEÓRICAS

5.1. Estructura de control. Aliviadero WES

La forma de la cresta del vertedero pretende simular la forma geométrica de la napa inferior de un vertedero de pared delgada, y ajustar la presión de la napa sobre el aliviadero a la presión atmosférica con el caudal de cálculo y evitar problemas de cavitación.

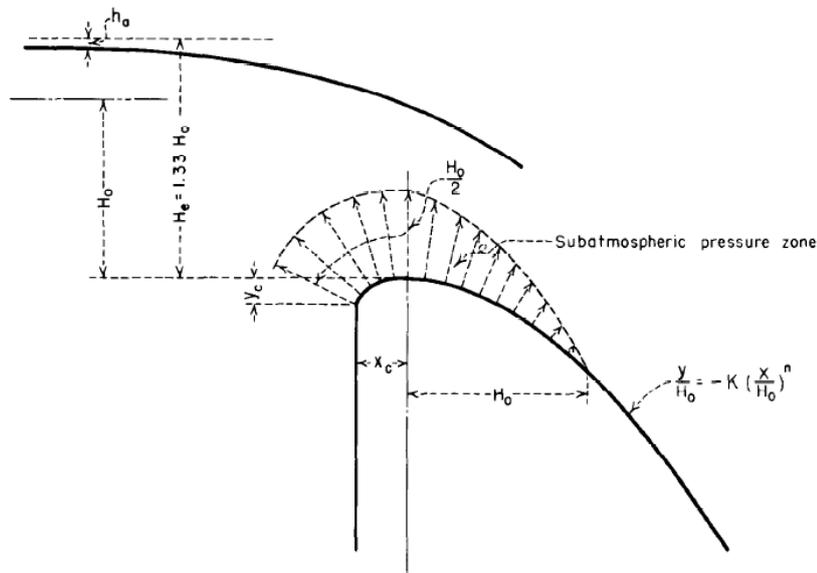


Figura 5.1. Gradiente de presiones sobre el aliviadero.

El fenómeno de la cavitación hace presencia cuando el caudal que circula por el aliviadero es superior al caudal de diseño. Por el contrario, cuando el caudal es inferior al de diseño, el gradiente de presiones sobre el aliviadero es superior a la presión atmosférica.

Con esta intención el U.S. Army Corp of Engineers desarrolló algunos perfiles característicos en su Waterways Exarimental Station (WES). El resultado de estas investigaciones condujo a la proliferación de este tipo de perfiles en infraestructuras hidráulicas de todo el mundo.

La parte superior de este tipo de vertederos queda definida por una curva simple o por una curva tangente circular compuesta, mientras que la parte de aguas abajo es definida por una ecuación de este tipo:

$$\frac{y}{H_0} = -K \left(\frac{X}{H_0}\right)^n \quad (5.1)$$

Donde K y n dependen de la inclinación del paramento de aguas arriba y velocidad de aproximación y H_0 es la carga total sobre el aliviadero.

5.2. Flujo sobre el vertedero

El caudal vertido por este tipo de aliviaderos es $Q = CLH_0^{\frac{3}{2}}$ donde:

Q = caudal.

C =coeficiente de vertido.

L = longitud efectiva de coronación.

H_0 =carga total sobre la coronación.

El coeficiente de desagüe C queda influenciado por diversas variables como inclinación del paramento, calado de aguas arriba y de aguas abajo y otras consideraciones constructivas.

La velocidad teórica a la salida de la estructura se encuentra aplicando Bernoulli aguas arriba y al pie, quedando la siguiente expresión $V_1 = \sqrt{2g(Z + h_a - y_1)}$ donde Z es la altura desde la solera del canal al pie hasta el nivel de la lamina aguas arriba, h_a es la carga de velocidad aguas arriba e y_1 es el calado contraído al pie del aliviadero.

La pérdida de energía por fricción hace diferir los resultados teóricos con los experimentales, en los cuales la diferencia es mayor cuanto menor es la carga (H) y mayor es la caída (Z). Otro factor importante en la pérdida de carga es la pendiente del aliviadero, produciéndose mayores pérdidas con menores pendientes mientras que, por el contrario, en pendientes elevadas la pérdida por fricción no es significativa.

5.3. Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es una elevación abrupta en el nivel del agua cuando por un canal circula agua en régimen supercrítico y esta se retiene debido a las condiciones de flujo de aguas abajo, exactamente cuando se igualan los momentos aguas arriba y aguas abajo.

La formulación del resalto hidráulico se obtiene igualando las fuerzas exteriores, que actúan en la masa de agua, con el incremento de la cantidad de movimiento. La formula general es:

$$V_1^2 = g \frac{a_2 \bar{y}_2 - a_1 \bar{y}_1}{a_1 \left(1 - \frac{a_1}{a_2}\right)} \quad (5.2)$$

V_1 = velocidad antes del resalto.

a_1 y a_2 = áreas antes y después del resalto.

y_1 e $y_2 = a$ a las profundidades desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad de las secciones transversales.

En términos de caudal, la formula general es:

$$Q^2 = g \frac{a_2 \bar{y}_2 - a_1 \bar{y}_1}{\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right)} \quad (5.3)$$

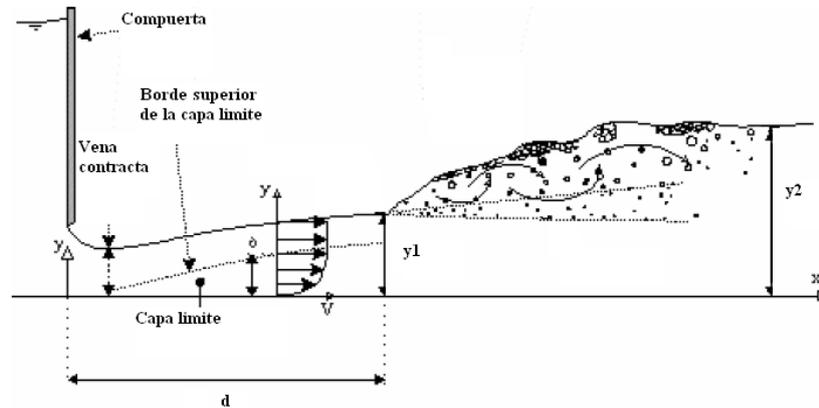


Figura 5.2. Resalto hidráulico.

5.4. Tipos de resaltos hidráulicos

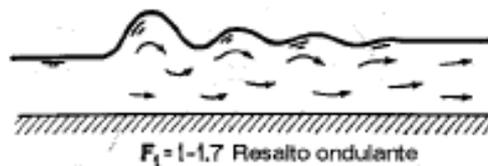
Los resaltos hidráulicos sobre soleras horizontales se clasifican en varias clases. De acuerdo con los estudios del U.S Bureau of Reclamation estos pueden clasificarse convenientemente según el número de Froude al inicio del resalto:

- $F_1=1$, el flujo es crítico y no se forma el resalto.
- $1 < F_1 < 1.7$, la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto ondulante*.
- $1.7 < F_1 < 2.5$ se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero aguas abajo la lamina es muy uniforme. La pérdida de energía es baja. Este se denomina *resalto débil*.
- $2.5 < F_1 < 4.5$ existe un chorro que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, que puede viajar a lo largo de varios kilómetros, se produce entonces el *resalto oscilante*.
- $4.5 < F_1 < 9$ la extremidad de aguas abajo del remolido superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos

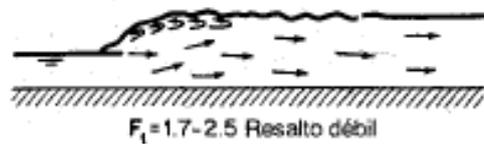
sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía entre 45% y 70%. Se presenta entonces el *resalto estable*.

- $F_1 > 9$, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que discurren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando oscilaciones hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Este resalto se denomina *resalto fuerte*.

Se debe recalcar que los rangos del número de Froude dados arriba para los siguientes tipos de resalto no están claramente demarcados sino que se trasladan en cierto modo según las condiciones locales.



$F_1 = 1- 1,17$ Resalto ondulante



$F_1 = 1,7- 2,25$ Resalto débil



$F_1 = 2,5- 4,5$ Resalto oscilante



$F_1 = 4,5-9,0$ Resalto estable



$F_1 > 9,0$ Resalto fuerte

Figura 5.3. Tipos de resaltos hidráulicos.

5.5. Pérdida de energía.

En muchas aplicaciones la función principal del resalto hidráulico es la disipación de energía. En un canal horizontal, el cambio de la energía cercana al salto es:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (5.4)$$

donde

ΔE = cambio de energía de la sección 1 a la 2.

E_1 = energías específica en la sección 1

E_2 = energía específica en la sección 2

La pérdida de energía ΔE en el resalto se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{q^2}{2gy_1^2} + y_1 = \frac{q^2}{2gy_2^2} + y_2 + \Delta E$$

En el caso de un canal rectangular, la pérdida de energía es:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (5.5)$$

Y por tanto

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{2 - 2(y_2 y_1) + F_1^2 [1 - (y_1 y_2)^2]}{2 + F_1^2} \quad (5.6)$$

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se define como la eficiencia, siendo esta:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2 (2 + F_1^2)} \quad (5.7)$$

6. ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL

6.1. Introducción

El resalto hidráulico es un fenómeno bien conocido como método útil para disipar el exceso de energía de flujos de alta velocidad.

Los resaltos hidráulicos pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de canal en los que ocurren, como resaltos hidráulicos en canales rectangulares y no rectangulares, resaltos hidráulicos en canales horizontales e inclinados y resaltos hidráulicos forzados. Los resaltos hidráulicos pueden ser clasificados también como resaltos hidráulicos libres y resaltos hidráulicos sumergidos y como resaltos al pie de la estructura de control y desplazados.

En este proyecto se presenta un estudio sistemático de las formas más fundamentales de resaltos hidráulicos en canales rectangulares aguas abajo de un aliviadero.

6.2. Condiciones de flujo y características de la longitud del resalto.

6.2.1. Resaltos Hidráulicos Libres

6.2.1.1 Características de la longitud del resalto

En cuanto a la longitud del resalto, en proyectos fin de carrera realizados en años anteriores, se obtuvo experimentalmente con el procedimiento que se explicará más adelante, considerando como inicio el punto donde se producen oscilaciones irregulares en la dirección del canal ($x=0$), y el final como la primera sección en la que no existe ya variación apreciable en la distribución de velocidades ($x=L_j$), coincidiendo en que es la sección en la que ya no se observa ninguna alteración en la superficie del agua.

De acuerdo con lo dicho en el párrafo anterior, L_j es la longitud del resalto, siendo y_1 la profundidad de agua al inicio del resalto, $x=0$, e y_2 la profundidad al final del resalto, $x=L_j$.

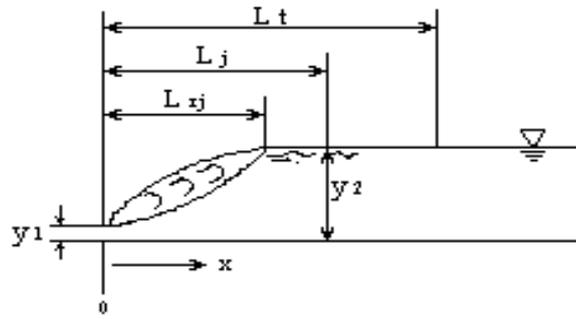


Figura 6.1. Definición esquemática para el resalto libre

En la sección ($x=L_{rj}$) se define el final del rulo del resalto, L_{rj} . También indica el final de la zona de separación entre L_{rj} y L_j .

García (2008) y Vicente (2008) en sus respectivos proyectos representaron L_j/y_1 medida en función del número de Froude, junto con la ecuación 6.3 propuesta por Silvester (1964), obteniendo la ecuación 6.1 y observaron que la curva de ajuste que obtuvieron con sus datos es similar a la de Silvester (1964):

$$L_{jc} / y_1 = 9,51(F_1 - 1)^{0,879} \quad (6.1)$$

También le ocurrió a Márquez (2006);

$$L_{jc} / y_1 = 9,8(F_1 - 1)^{0,80} \quad (6.2)$$

Para este proyecto fin de carrera no se tomaron valores experimentales de longitud de resalto, tal y como hicieron Márquez (2006), Vicente (2008) y García (2008), sino que tomamos la relación de Silvester (1964) para hallar la longitud de nuestros resaltos hidráulicos, ya que para los resaltos no desarrollados, que son los utilizados en este proyecto, la ecuación 6.3 se ajusta muy bien a los no desarrollados, como se representa en la figura. 6.3.

$$L_j / y_1 = 9,75(F_1 - 1)^{1,01} \quad (6.3)$$

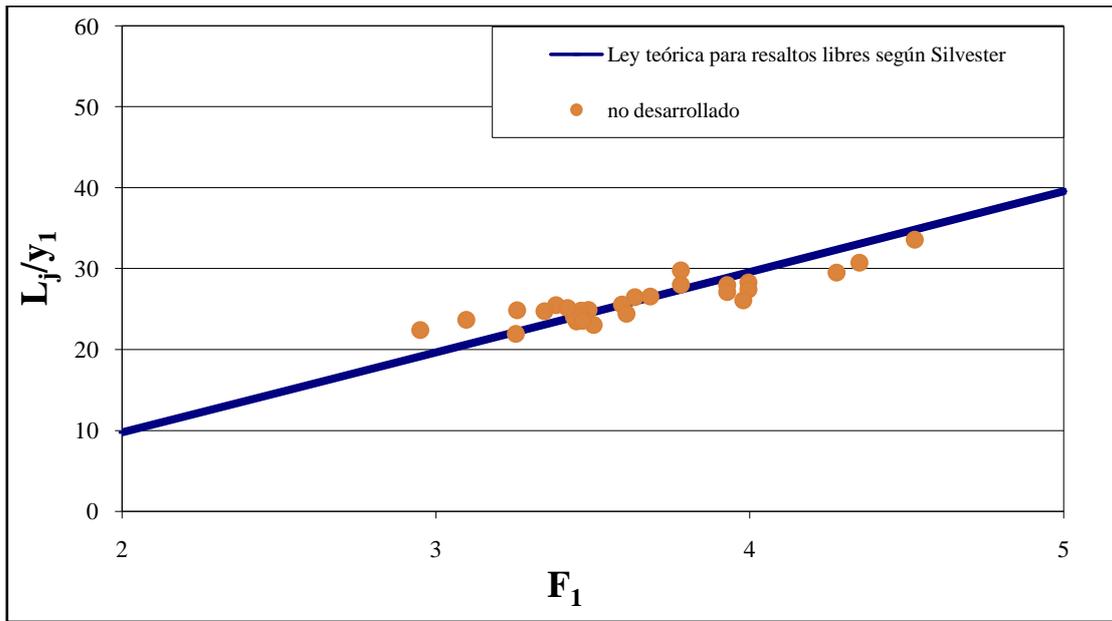


Figura 6.3. Características de la longitud del resalto libre para aliviadero. García, 2008

6.2.2 Resallos hidráulicos sumergidos.

6.2.2.1. Características de la longitud del resalto.

Considerando y_0 como el calado contraído e y_3 como la profundidad al comienzo del resalto sumergido, se formaron diversos resallos para observar las condiciones de flujo.

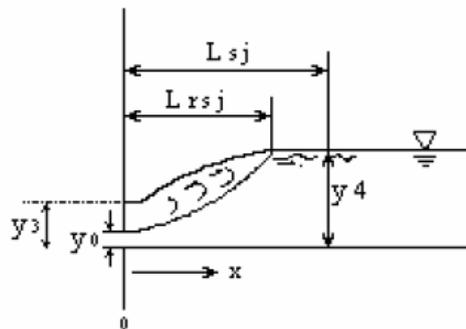


Figura 6.4. Definición esquemática para el resalto sumergido.

En este proyecto fin de carrera, no hallamos la longitud verdadera del resalto para los resallos sumergidos, sino que utilizamos una longitud igual a la del resalto libre con mismo caudal (fórmula de Silvester (1964) ecuación 6.3) para poder hacer las comparaciones pertinentes en la misma posición, del resalto libre y de los sumergidos.

6.3 Relación entre calados inicial y final.

6.3.1 Resaltos hidráulicos libres

Seleccionando la zona de un resalto libre en un canal horizontal como un volumen de control, la ecuación 6.5 se puede derivar de la ecuación de momentum 6.4, que es aplicada en la dirección-x, junto con una ecuación de continuidad bajo las siguientes suposiciones:

- 1) el resalto se forma sobre un fondo horizontal de gran anchura,
- 2) la turbulencia es insignificante al comienzo del resalto,
- 3) las tensiones viscosa y turbulenta son insignificantes sobre la superficie libre

$$\int_S \bar{V}(n_0 \cdot \bar{V}) dS = \int_S n_1 \bar{p} dS - \left[\int_S \mu \frac{\partial \bar{V}}{\partial n_1} dS + \rho \int_S \overline{V'(n_0 \cdot V')} dS \right] \quad (6.4)$$

Donde $\bar{V} = \bar{u}i + \bar{v}j$ (velocidad media temporal), $V' = u'i + v'j + w'k$ (velocidad turbulenta fluctuante), p : intensidad de presión media temporal, S : superficie de control, n_0 : vector unitario normal hacia fuera de dS , n_1 : vector unitario normal hacia dentro de dS .

$$\rho Q(\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) = \lambda_1' \gamma (h_g A)_1 - \lambda_2' \gamma (h_g A)_2 - \int_0^{L_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho(-\overline{u'v'}) \right)_{y=0} dx - \int_0^{y_2} (\rho \overline{u'^2})_{x=L_j} dy \quad (6.5)$$

donde:

ρ : densidad del agua.

A : área de la sección.

y : coordenada vertical dirigida hacia arriba empezando desde el fondo del canal.

Q : caudal unitario ($q = Q/B$).

$$\beta = \int_A (\bar{u}/v)^2 dA/A$$

$$\lambda' = 1 + \left(\frac{1}{h_g A} \right) \int_A \left(\frac{\Delta p}{\gamma} \right) dA$$

h_g Profundidad al centro de gravedad de la sección (en la sección rectangular,

$$h_g = y/2)$$

γ : Peso específico del agua ($\gamma = \rho \cdot g$)

($\Delta\beta$: Indica la desviación de la presión hidrostática)

En forma adimensional, la ecuación 6.5 se puede expresar como:

$$\lambda^2 \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + [2(\gamma_2 - \beta_1)F_1^2 + S_f - \lambda^1] \left(\frac{y_2}{y_1}\right) + 2\beta_2 F_1^2 = 0 \quad (6.6)$$

donde:

$$S_f = \frac{P_f}{\gamma \frac{y_1^2}{2}}$$

($P_f = \int_0^{L_j} \tau_0 dx$; donde τ_0 es la tensión de corte en el contorno:

$$\tau_0 = \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho(-\overline{u'v'}) \right]_{y=0}$$

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}$$

$$\gamma_2 = \int_0^{y_2} \frac{u'^2 dy}{v_1^2 y_1}$$

La ecuación 6.6 se puede expresar también como:

$$F_1^2 = \frac{(y_2/y_1)[\lambda_2'(y_2/y_1)^2 + S_f - \lambda_1']}{2[(1 + \Delta\beta_1 - \gamma_2)(y_2/y_1) - (1 + \Delta\beta_1)]} \quad (6.7)$$

donde:

$$\beta_1 = 1 + \Delta\beta_1$$

$$\beta_1 = 1 + \Delta\beta_2$$

Cuando $\lambda_1' = \lambda_2' = 1$, $S_f = 0$, $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_2 = 0$ y $\gamma_2 = 0$, la ecuación 6.7 se puede reducir a la común relación de profundidad seciente o ecuación de los calados conjugados de Bélanger, ecuación 6.8:

$$\frac{y_2}{y_1} = (\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1)/2 \quad (6.8)$$

Harleman (1958) encontró que los errores debidos a la uniformidad asumida del flujo ($\beta_1 = \beta_2 = 1$) y a no tener en cuenta la turbulencia al comienzo y al final del resalto ($\gamma_1 = \gamma_2 = 0$) son muy pequeños y tienden a cancelarse unos a otros, y que la tensión de corte del fondo integrada S_f es el único término adicional importante a considerar:

Por esta razón, $\lambda_1' = \lambda_2' = 1$, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ y $\gamma_2 = 0$ y la ecuación 6.6 se deduce la ecuación 6.9:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - [2F_1^2 + 1 - S_f](y_2/y_1) + 2F_1^2 = 0 \quad (6.9)$$

Desde la ecuación 6.9 se puede observar que a mayores valores de S_f y para un valor de F_1 dado, la relación y_2/y_1 , tiende a ser más pequeña.

Rajaratnam (1965), demostró que los datos obtenidos para diversos experimentos y de diversa procedencia, mostraban mejor concordancia con la ecuación 6.9 que con la ecuación 6.8. De acuerdo con esto, en un supuesto Caso “a” referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo no desarrollado, justo debajo de la compuerta, el valor experimental de y_2/y_1 para un F_1 dado era algo más pequeño que el valor de y_2/y_1 dado por la ecuación 6.8; pero en un supuesto Caso “b” referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado, se asumía que el valor experimental podía coincidir con el valor de y_2/y_1 derivado de la ecuación 6.8. Esto se explicaba por la suposición de que en el Caso “a”, los efectos de S_f podrían ser grandes dado que la capa límite no se separa del fondo del canal, mientras que en el Caso “b”, $S_f \approx 0$, porque la capa límite podría estar separada del fondo del canal (flujo totalmente desarrollado).

Ohtsu et Al. (1990) también encuentran diferencias entre las relaciones de los calados conjugados para los casos “a” y “b”, pero consideran que las diferencias son pequeñas y sugieren que para propósito de diseño práctico, se aplique indistintamente la ecuación de Bélanger, a los resaltos con flujo totalmente desarrollado y parcialmente desarrollado.

En el proyecto de Garcia (2008) se demostró que los ensayos muestran una mejor tendencia a la ecuación teórica de *Bélanger* (ecuación 6.8). Dada la similitud con las relaciones ya descritas y el pequeño rango de *Froude* que abarca nuestro trabajo, nos abstenemos de obtener una relación de calados conjugados para flujo potencial, concluyendo que para este caso la formulación más aproximada es la ecuación de Bélanger.

6.3.2 Resaltos hidráulicos sumergidos

Seleccionando la zona de un resalto sumergido como volumen de control, la ecuación 6.10 puede ser derivada de la ecuación de momentos aplicada en la dirección-x junto con la ecuación de continuidad, bajo las siguientes suposiciones:

- 1) el canal es horizontal y prismático,
- 2) la distribución de presiones es hidrostática antes y después del resalto,
- 3) la tensión de corte se desprecia
- 4) los coeficientes de momento o de Boussinesq son $\beta_0 = \beta_4 = 1$
- 5) la tensión de Reynolds en la superficie del volumen de control no se tiene en cuenta.

$$(\rho g h_3)^3 - (\rho g h_4)^3 = \frac{Q^2}{g} \frac{A_0 - A_4}{A_0 A_4} \quad (6.10)$$

donde el subíndice “0” se refiere a parámetros hidráulicos en la sección de salida o “desagüe”, el subíndice “3” se refiere al comienzo del resalto sumergido, y el subíndice “4” se refiere al final del resalto sumergido.

Para el caso de un canal rectangular, se puede derivar la siguiente expresión:

$$\frac{y_3}{y_0} = \sqrt{\frac{2 F_0^2 \left(1 - \left(\frac{y_4}{y_0}\right)\right)}{\left(\frac{y_4}{y_0}\right)} + \left(\frac{y_4}{y_0}\right)^2} \quad (6.11)$$

Si $\frac{y_3}{y_0} = 1$ en la ecuación 6.11, ésta coincide con la ecuación 6.8 para profundidad secuente del resalto libre.

Según Márquez (2006) los valores de las ecuaciones para cada Froude poseen una estrecha concordancia entre los valores teóricos y los valores experimentales.

Márquez también realizó ajuste de $(y_4/y_3)/F_0$ y y_3/y_0 siendo la ecuación 6.12.

$$\frac{y_4}{y_3} = \left[1.1728 \left(\frac{y_3}{y_0}\right)^{-0.7661} \right] F_0 \quad (6.12)$$

6.4. Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos

6.4.1. Resaltos Hidráulicos Libres

Aplicando la ecuación de la energía del flujo medio para la zona de resalto ($0 \leq x \leq L_j$), se obtiene la ecuación 6.16. En este caso, los términos de tensión viscosa media y los efectos de la tensión de Reynolds en la superficie de control, no se tienen en cuenta:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_1 y_1 &= \\ &= \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \lambda_2 y_2 + \left[-\frac{1}{\gamma} \int_{(D)} \left\{ \rho(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \overline{u'v'} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right\} dw \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

donde:

α es el coeficiente de energía o de Coriolis

$dw (= dA \cdot ds)$ es el volumen elemental infinitesimal

$$\lambda = 1 + (1/Qh) \int_{(A)} (\Delta p / \gamma) u dA$$

En las secciones $x=0$ y $x=L_j$, es posible poner $\alpha = 1$ y $\lambda = 1$.

De acuerdo con esto, la ecuación 6.13 puede ser expresada como la ecuación 6.14:

$$\frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2 + \left[-\frac{1}{\gamma} \int_0^{L_j} \int_0^{y(x)} \left\{ \rho(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \overline{u'v'} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right\} dy dx \right] \quad (6.14)$$

Si la ecuación de energía para la turbulencia es aplicada a los resaltos, se obtiene la ecuación 6.15. En este caso, los términos de tensión viscosa media, la difusión de energía turbulenta, los efectos de las fluctuaciones de presión y las tensiones viscosas causadas por la turbulencia en la superficie de control, no se tienen en cuenta comparados con otros factores:

$$\text{Prod.Turb.}=\text{Disip.Vis.}+\text{Convecc.Turb.} \quad (6.15)$$

donde:

Prod.Turb. = [tercer término en el lado de la derecha de la ecuación 6.14]=Cantidad total de energía transferida desde el flujo medio a la energía turbulenta (producción turbulenta).

Disip.Vis. = Disipación viscosa

Convecc.Turb. = Convección de energía turbulenta (relación en que la energía cinética turbulenta es transmitida)

$$\text{Disip.Vis.} = \frac{1}{\gamma} \int_0^{L_j} \int_0^{y(x)} \mu \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} dy dx$$

$$\text{Convecc.Turb.} = \frac{1}{\gamma} \int_0^{y_2} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} u dy$$

donde

$$V'^2 = u'^2 + v'^2 + w'^2$$

De la ecuación 6.14 y la ecuación 6.15, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$H_1 = H_2 + (\text{Disip.Vis.} + \text{Convecc.Turb.}) \quad (6.16)$$

donde:

$$H_1 = \frac{v_1^2}{2g} + y_1$$

$$H_2 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2$$

Sin embargo, la ecuación 6.16 puede ser rescrita en la forma de la ecuación 6.17:

$$100(\%) = \left(\frac{Disip.Vis.}{(H_1 - H_2)} + \frac{Ind.Turb.}{(H_1 - H_2)} \right) 100(\%) \quad (6.17)$$

Ohtsu et Al. (1990) a partir de las medidas de velocidad media \bar{u} e intensidad turbulenta $\overline{u'^2}$, en las secciones donde $x \geq L_j$, y haciendo uso de la suposición de que $\overline{V'^2} = 2\overline{u'^2}$, obtienen los valores de $(Convecc.Turb.)_x$

	F_1	Convecc.Turb./ $(H_1 - H_2)$ (%)	Disip.Vis./ $(H_1 - H_2)$ (%)
Caso a	3,79	5,4	94,6
Caso a	4,05	3,5	96,5
Caso a	5,19	3,0	97,0
Caso a	5,83	2,5	97,5
Caso a	7,12	1,5	98,5
Caso a	8,19	1,0	99,0
Caso b	3,93	4,2	95,8
Caso b	4,29	5,0	95,0
Caso b	4,47	4,7	95,3
Caso b	5,04	1,7	98,3
Caso b	5,68	1,3	98,7

Tabla 7. Valores de Convecc.Turb./ $(H_1 - H_2)$ y Disip.Vis./ $(H_1 - H_2)$

Encuentran que los valores de Disip.Vis./ $(H_1 - H_2)$ resultan ser muy superiores a los de Convecc.Turb./ $(H_1 - H_2)$ en la medida en que Disip.Vis./ $(H_1 - H_2)$ representa entre el 94 y el 99% y convecc.Turb./ $(H_1 - H_2)$ representa entre el 1 y el 6% en la disipación de la

turbulencia. Por esta razón, se puede concluir que $\text{Convecc.Turb.}/(H_1-H_2)$ es despreciable.

De este modo, se pueden derivar la ecuación 6.18 y la ecuación 6.19:

$$H_1 = H_2 + \text{Disip.Vis.} \quad (6.18)$$

$$\text{Prod.Turb.} = \text{Disip.Vis.} \quad (6.19)$$

En otras palabras, cuando $x \leq L_j$, la mayoría de la turbulencia se ha disipado por disipación viscosa (fenómeno de disipación de energía en cascada).

De acuerdo con esto, L_j puede ser interpretado como la longitud de la zona necesaria para que la disipación de energía en el resalto se complete, y la pérdida de energía H_L entre el inicio ($x=0$) y el final ($x=L_j$) del resalto puede ser expresada mediante la siguiente ecuación unidimensional:

$$H_L = H_1 - H_2 = (v_1^2 / 2g + y_1) - (v_2^2 / 2g + y_2) \quad (6.20)$$

Usando la ecuación 6.20 junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada con la ecuación 6.21:

$$\frac{H_L}{H_1} = \frac{2(1 - \frac{y_2}{y_1}) + (1 - \frac{1}{(y_2/y_1)^2})F_1^2}{2 + F_1^2} \quad (6.21)$$

Analizando la ecuación 6.20 y la ecuación 6.21, la relación entre H_L/H_1 y F_1 se representa en la figura 6.5.

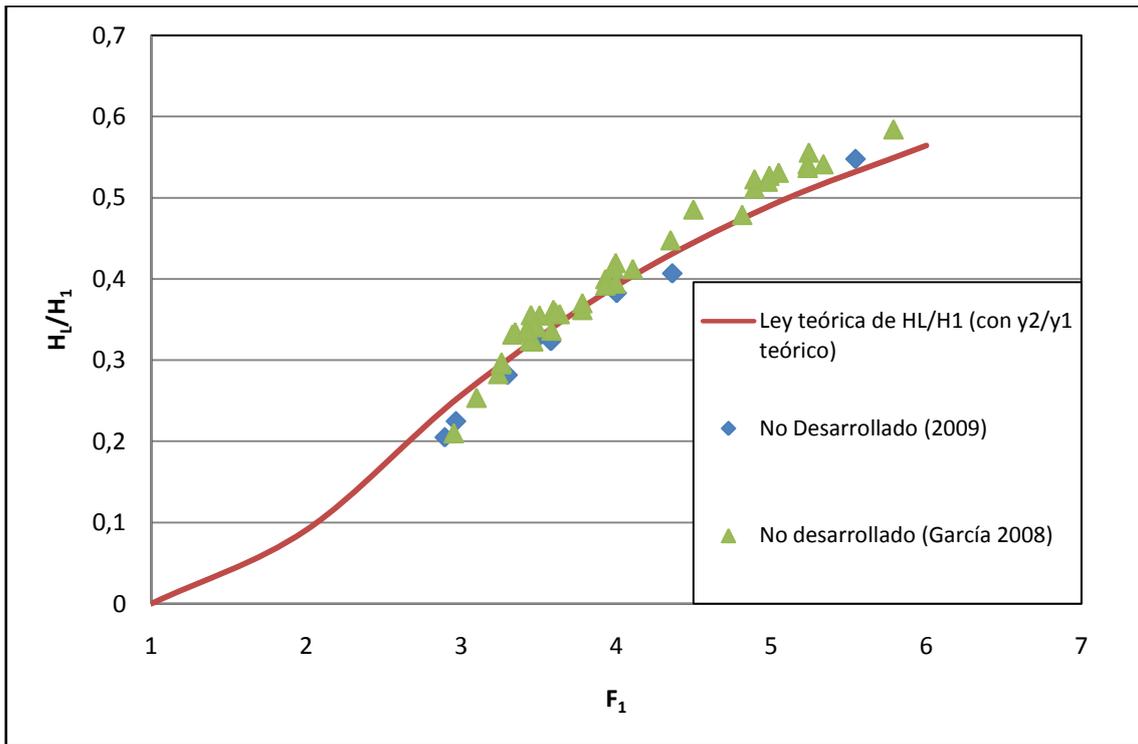


Figura 6.5 Pérdida de energía relativa en resaltos libres.

Analizando la representación de la pérdida de energía relativa en los resaltos libres estudiados, en función de los valores de Froude considerados y la relación correspondiente y_2/y_1 según la ecuación 6.8 (Ecuación de Bélanger de los calados conjugados), junto con la ley teórica propuesta según la ecuación 6.21, se observa que el resultado de la comparación entre los valores teóricos y los experimentales de los resaltos no desarrollados se ajustan a la ley teórica hasta un *Froude* de 5, y es algo superior a partir de este número de *Froude*.

6.4.2. Resaltos Hidráulicos Sumergidos

Basándonos en consideraciones similares a las señaladas para el caso de resaltos libres:

$$H_0 = H_4 + (Disip.Vis. + Convecc.Turb.) \quad (6.22)$$

y

$$100(\%) = [Disip.Vis./(H_0 - H_4) + Convecc.Turb./(H_0 - H_4)] \times 100(\%) \quad (6.23)$$

donde:

$$H_0 = \lambda_3 y_3 + \alpha_0 v_0^2 / 2g$$

$$H_4 = \lambda_4 y_4 + \alpha_4 v_4^2 / 2g$$

$$\lambda_3 = \lambda_4 = 1$$

$$\alpha_0 = \alpha_4 = 1$$

$$Disip. Vis. = \frac{1}{\gamma q} \int_0^{L_{sj}} \int_0^{y(x)} \mu \left(\frac{\delta u_i'}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j'}{\delta x_i} \right) \frac{\delta u_i'}{\delta x_j} dy dx$$

$$Ind. Turb. = \frac{1}{\gamma q} \int_0^{y^4} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} \bar{u} dy$$

De las medidas de velocidad media \bar{u} e intensidad turbulenta $\overline{u'^2}$ en las secciones donde $x \geq L_{sj}$, y haciendo uso de la suposición de que $\overline{V'^2} = 2\overline{u'^2}$, se obtienen los valores de $(Ind. Turb.)_x$ en las secciones donde $x \geq L_{sj}$, donde:

$$(Convecc. Turb.)_x = \frac{1}{\gamma q} \left(\int_0^{y^4} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} \bar{u} dy \right)_{x=x}$$

Siendo q el caudal unitario circulante.

También, el valor de $Disip. Vis.$ se ha determinado por sustitución de los valores de H_0 , H_4 y $(Convecc. Turb.)_{x=L_{sj}}$ en la ecuación 6.22

Al igual que para el caso de los resaltos libres, los valores de $Disip. Vis. / (H_0 - H_4)$ resultan ser muy superiores a los de $Convecc. Turb. / (H_0 - H_4)$ y por este motivo se puede concluir que $Ind. Turb. / (H_0 - H_4)$ es despreciable. Entonces,

$$H_0 = H_4 + Disip. Vis. \tag{6.24}$$

$$Prod.Turb.=Disip.Vis. \quad (6.25)$$

De acuerdo con esto, L_{sj} se interpreta como la longitud de la zona requerida para disipar el total de la energía perdida en el resalto sumergido, y la pérdida de energía entre el inicio ($x=0$) y el final ($x=L_{sj}$) del resalto sumergido puede ser expresada mediante la siguiente ecuación unidimensional:

$$H_L = (v_0^2/2g + y_3) - (v_4^2/2g + y_4) \quad (6.26)$$

Usando la ecuación 6.26 junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada con la ecuación 6.27:

$$\frac{H_L}{H_0} = \frac{2\left(\frac{y_3}{y_0} - \frac{y_4}{y_0}\right) + (1 - 1/(y_4/y_0)^2)F_0^2}{2(y_3/y_0) + F_0^2} \quad (6.27)$$

Si $\frac{y_3}{y_0} = 1$ y $F_0 = F_1$, la ecuación 6.27 se reduce a la ecuación del resalto libre (ecuación 6.21).

La relación $H_L/H_0 = f(F_0, \frac{y_3}{y_0})$ para valores dados de $\frac{y_3}{y_0}$, derivada de las ecuaciones 6.27 y 6.8 se muestra en la figura 6.6 con línea continua para cada valor de $\frac{y_3}{y_0}$ considerado. La línea punteada en la figura 6.6 indica la pérdida de energía para el caso del resalto libre.

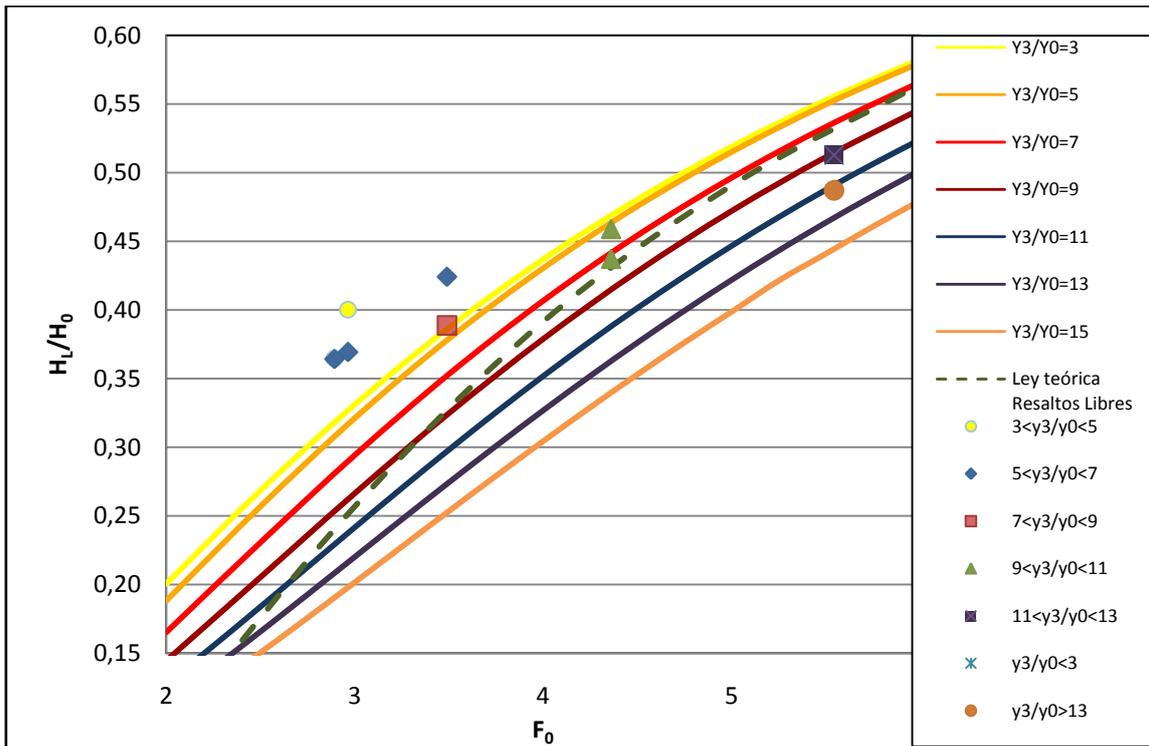


Figura 6.6. Pérdida relativa de energía en resaltos sumergidos. $H_L/H_0 = f\left(F_0, \frac{y_3}{y_0}\right)$

Se puede observar que los datos medidos dan una mayor pérdida de energía. Pero ésta sólo es aparente, puesto que en los resaltos sumergidos se alejan de la configuración teórica.

Del análisis del resalto y con el ánimo de ver la diferencia con la configuración de flujo teórico, los datos medidos fueron trasladados a la grafica a su posición correcta; así se despejó de la ecuación 6.27, el valor teórico del calado conjugado y_{3t} correspondiente.

En la figura 6.7 se puede ver el resultado obtenido.

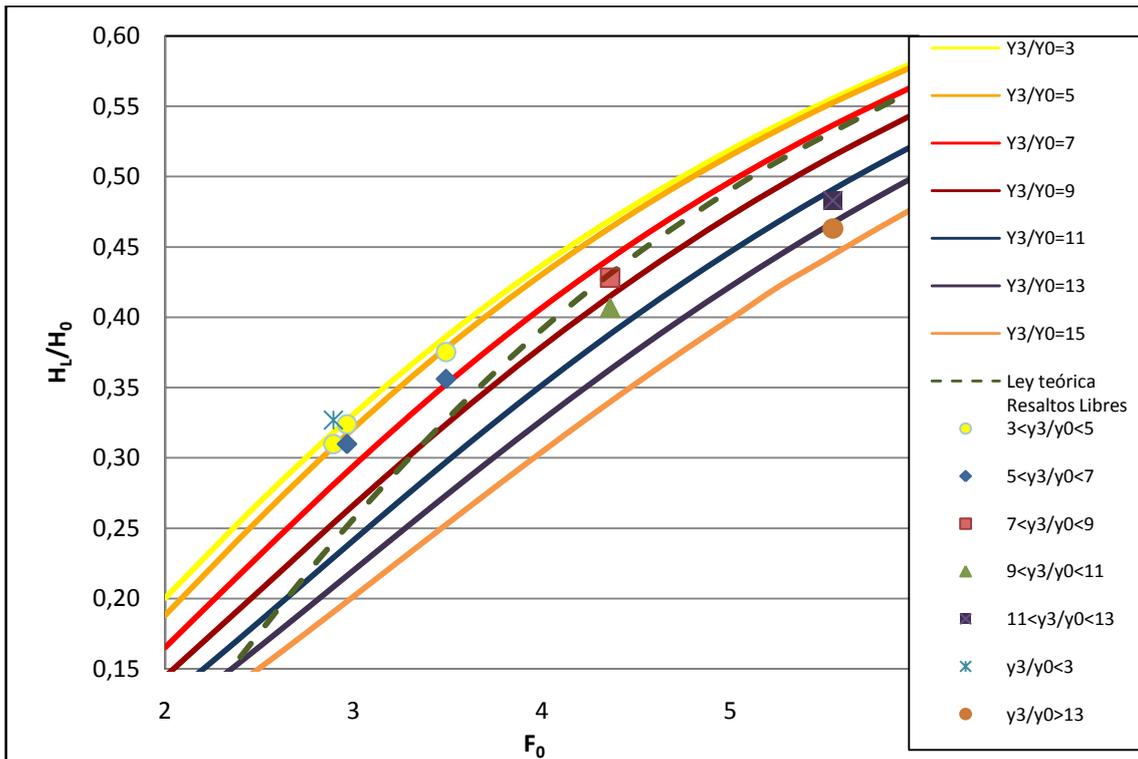


Figura 6.7. Pérdida relativa de energía en resaltos sumergidos. $H_L/H_0 = f\left(F_0, \frac{y_{3t}}{y_0}\right)$

Se observa que según la ley teórica 6.27 para los números de Froude mayores corresponden con pérdidas de energía relativa mayores.

Esta figura aclara que la pérdida de energía teórica en un resalto sumergido es mayor que la correspondiente en el resalto libre en un rango aproximado $1 < \frac{y_3}{y_0} < 7$. En otras palabras, bajo ciertas condiciones de sumergencia, es posible hacer un uso efectivo del resalto sumergido como disipador de energía.

El ajuste del calado teórico y_{3t} se encuentra en la figura 6.7, este ajuste se ha debido a que las sumergencias mayores producen en el aliviadero una reducción de la posición teórica de la energía.

A continuación proseguimos con las graficas convencionales ya corregidas por medio del calado teórico y_{3t} en vez del calado conjugado y_3 .

La figura 6.8 representada a continuación muestra la relación $H_L/H_0 = f\left(\frac{y_3}{y_0}, F_0\right)$

derivada de las ecuación 6.27 y 6.8 para valores dados de F_0 .

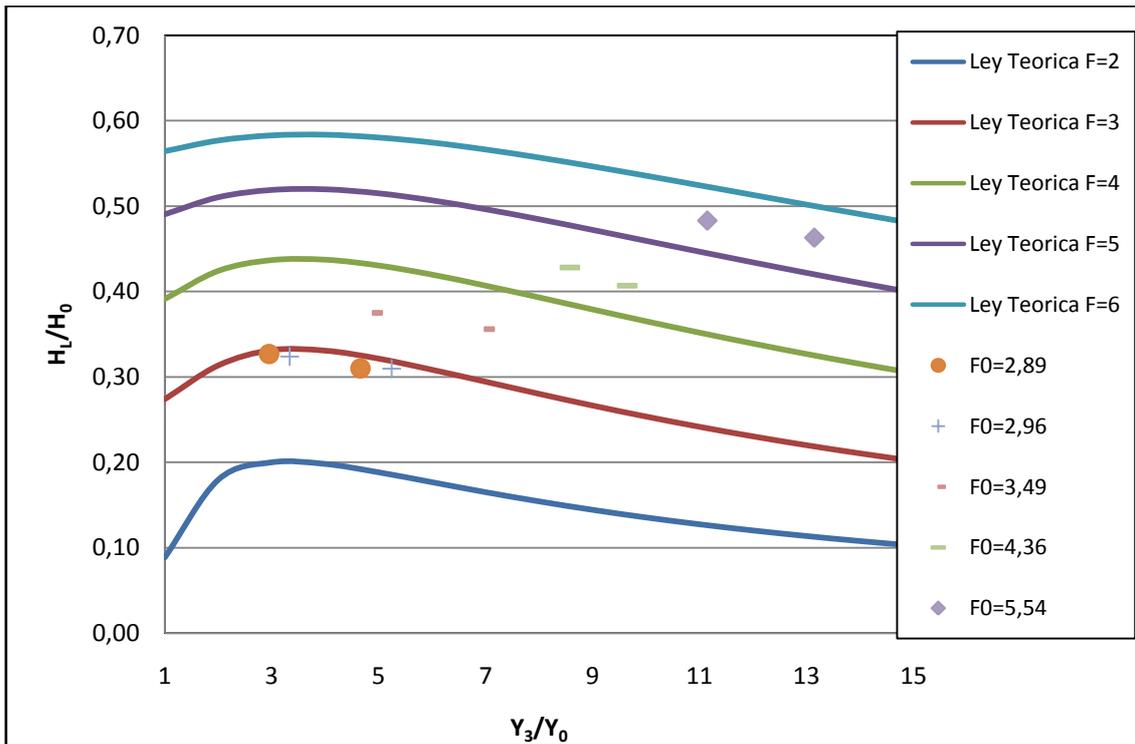


Figura 6.8. Pérdida de energía relativa en resaltos sumergidos: $H_1/H_0 = f\left(\frac{y_3}{y_0}, F_0\right)$

Como se puede observar en los resultados experimentales de la siguiente grafica, se ajustan bastante bien a las leyes teóricas representadas para cada valor de F_0 por lo que se pueden considerar como válidos.

En la figura 6.8 se aprecia claramente que para valores menores de F_0 , la disipación de energía relativa es inferior que para F_0 mayores.

Otra manera de evaluar la disipación de energía en resaltos libres y sumergidos es utilizando la expresión clásica siguiente:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.28)$$

En la Tabla 8 se indica el porcentaje de disipación de energía en el rango de números de Froude considerados.

Resultados Teóricos		
F1	H2/H1	Porcentaje de disipación de energía en velocidades teóricas medias
2,50	0,82	17,52
3,00	0,74	25,67
3,50	0,67	32,90
4,00	0,61	39,14
4,50	0,56	44,48
5,00	0,51	49,06
5,50	0,47	53,00

Tabla 8. Resultados teóricos

Para tratar los resultados experimentales obtenidos en laboratorio se ha calculado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos considerando las velocidades medias. El valor de velocidad media se ha considerado como el intermedio entre el valor de velocidad media en la sección 4 al final del resalto donde $x=L_j$ y el valor de velocidad máxima obtenido en la sección 5 localizada a una distancia intermedia entre el final del resalto y la mitad del canal. Se han utilizado las siguientes expresiones para calcular la disipación de energía:

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right) \times 100 \quad (6.29)$$

Para el caso de los resaltos libres, donde:

$$H_1 = (v_1^2 / 2g + y_1) \quad \text{y} \quad H_2 = (v_2^2 / 2g + y_2)$$

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_4}{H_0}\right) \times 100 \quad (6.30)$$

Para el caso de los resaltos sumergidos, donde:

$$H_0 = (v_0^2 / 2g + y_0) \quad \text{y} \quad H_4 = (v_4^2 / 2g + y_4)$$

Como se puede observar en las figuras 6.9 y 6.10 existe un buen acorde entre las disipaciones de energía para velocidades medias en los resaltos libres y sumergidos y los correspondientes valores teóricos.

Es relevante indicar que comparando las figuras 6.9 y 6.10 se observa que la disipación de energía para resaltos sumergidos es ligeramente superior que para el caso de los resaltos libres.

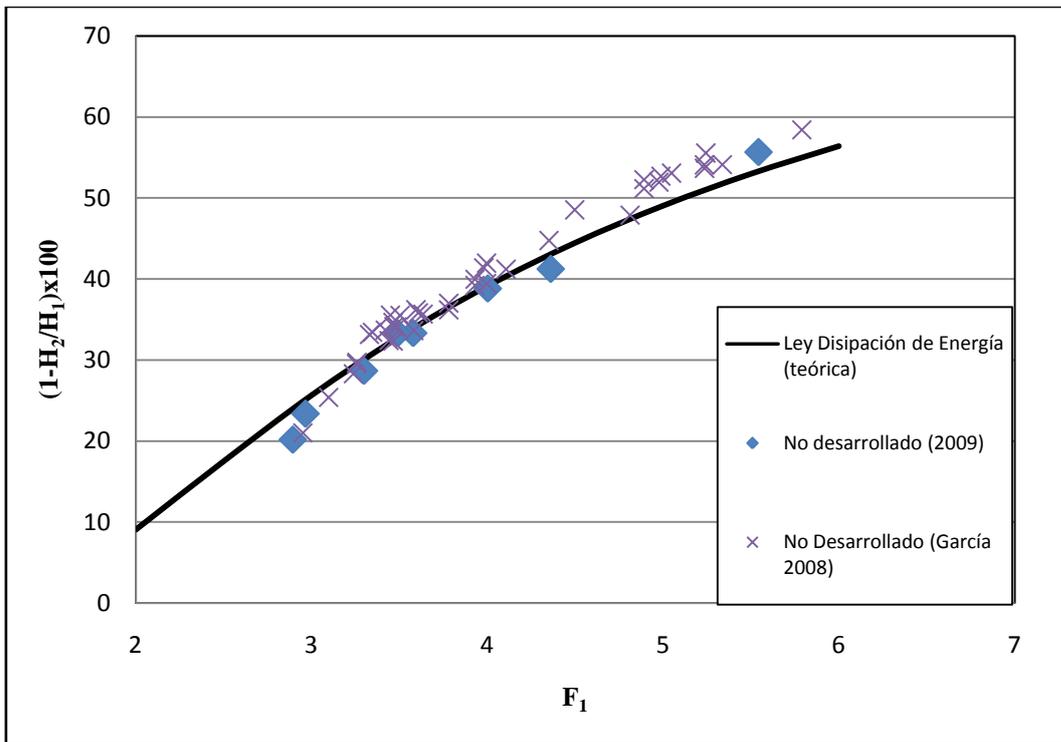


Figura 6.9. Disipación de energía en resaltos libres para velocidades medias.

Analizando la figura anterior podemos observar el hecho de que el efecto de la capa límite lubrica el deslizamiento del flujo no desarrollado, y por tanto, se produce una pérdida por fricción menor a la teórica para *Froude* pequeños

A continuación se muestra la figura 6.10 con la disipación de energía para el caso de resaltos sumergidos y velocidades medias, donde podemos comprobar que no se ajusta del todo a la ley teórica.

Tiene especial interés el que, aunque no se ajuste, sigue una tendencia con una pendiente menos inclinada que la teórica.

También cabe destacar que para la sumergencia mayor, la pérdida de energía es mayor.

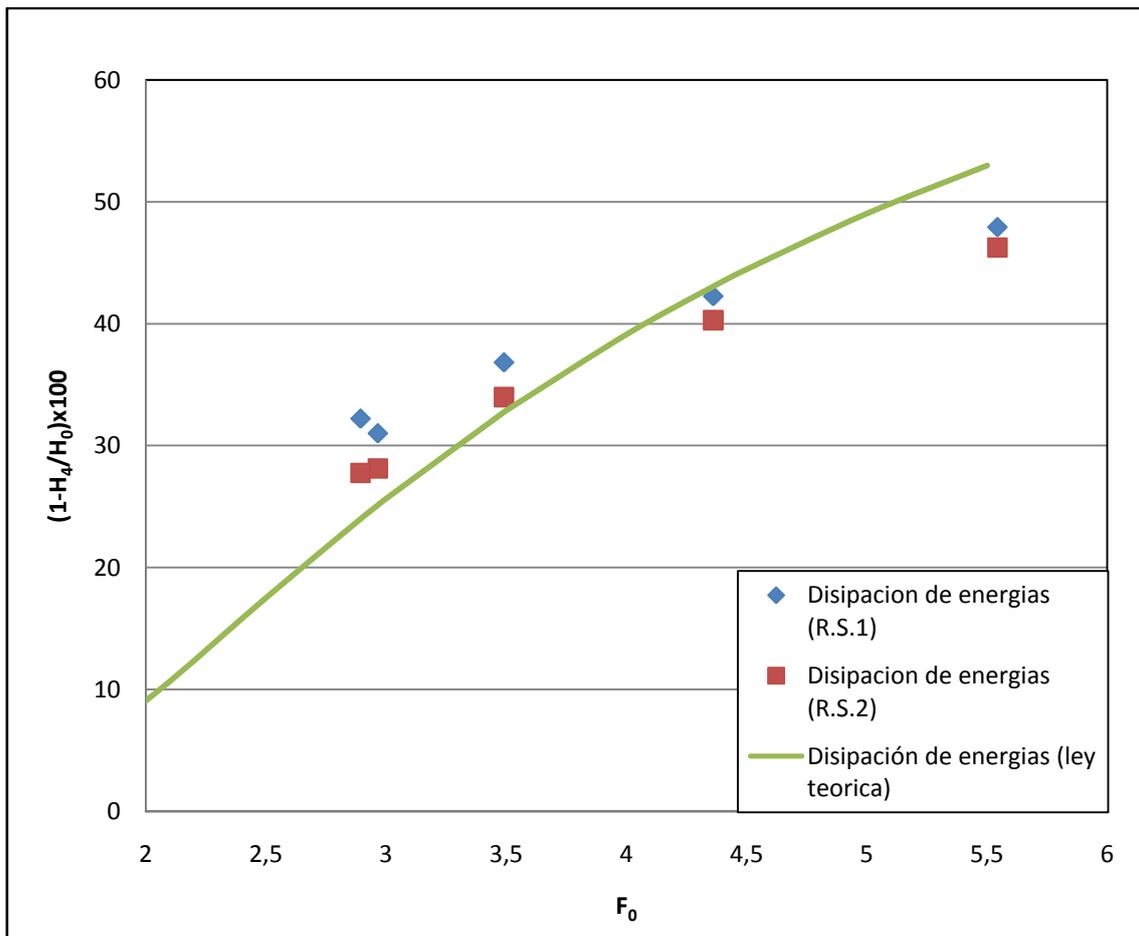


Figura 6.10. Disipación de energía en resaltos sumergidos para velocidades medias.

Por último se ha evaluado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos debida únicamente a la reducción de velocidades máximas entre la sección inicial del resalto ($x=0$) y la sección final del mismo donde $x=L_j$. Se han utilizado las siguientes expresiones:

% reducción de velocidad máxima experimental:

$$\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \times 100 \tag{6.31}$$

para el caso de resaltos libres

% reducción de velocidad máxima experimental:

$$\left(1 - \frac{v_4}{v_0}\right) \times 100 \quad (6.32)$$

para el caso de resaltos sumergidos

Los resultados obtenidos para los resaltos libres y sumergidos se muestran en las figuras 6.11 y 6.12 respectivamente:

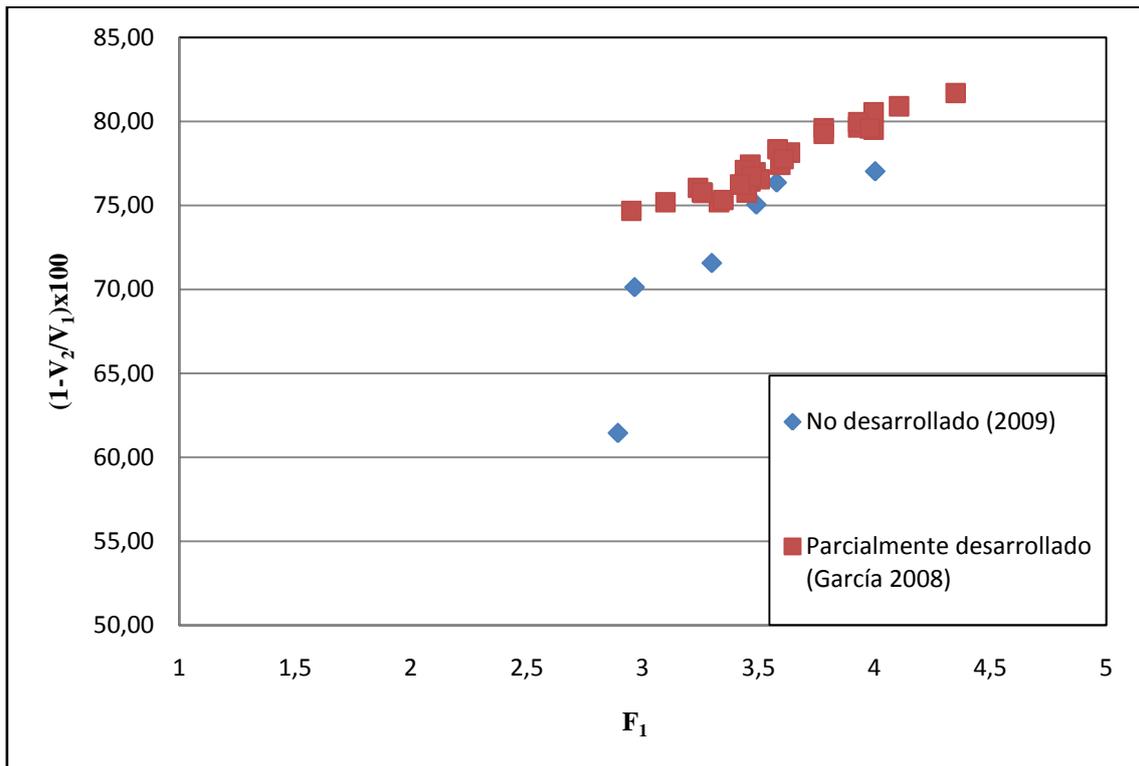


Figura 6.11. Reducción de velocidades máximas en resaltos libres.

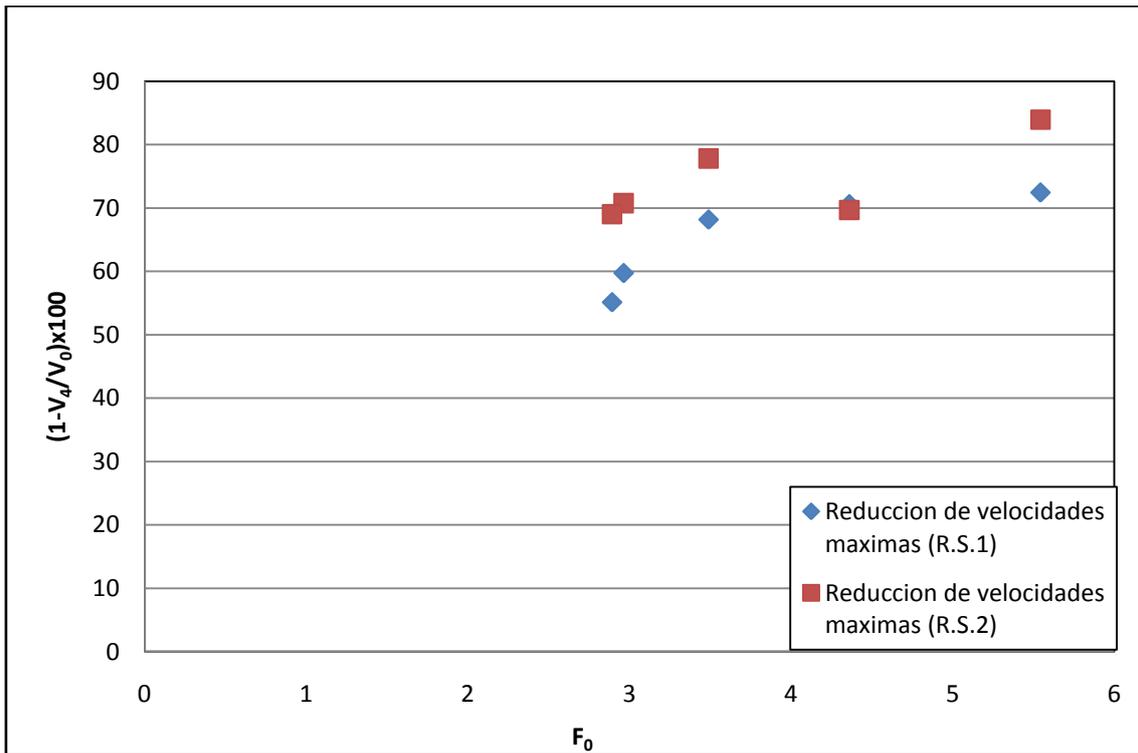


Figura 6.12. Reducción de velocidades máximas en resaltos sumergidos.

En el caso de resaltos sumergidos no tenemos datos de campañas anteriores, pero con los que tenemos podemos llegar a algunas conclusiones como que en los resaltos sumergidos la disipación de energía debida únicamente a la reducción de velocidades máximas es mayor que para los resaltos libres, por lo cual llegamos a la conclusión de que las pérdidas de energía son mayores en los resaltos sumergidos que en los libres en el caso del aliviadero.

6.5. Longitud del resalto hidráulico

Con respecto a la longitud del resalto hidráulico, muchos datos experimentales han sido analizados sin ninguna base teórica. Se ha intentado incluso analizar los datos considerando el significado físico.

Si la longitud del resalto L es interpretada como la longitud de la zona requerida para disipar la energía en el resalto, entonces L debería ser función de la energía específica H_* al comienzo del resalto y de la energía pérdida H_L en el resalto (Figura 6.13), implicando la siguiente relación:

$$f(L/H_L, H_L/H_*) = 0 \quad (6.33)$$

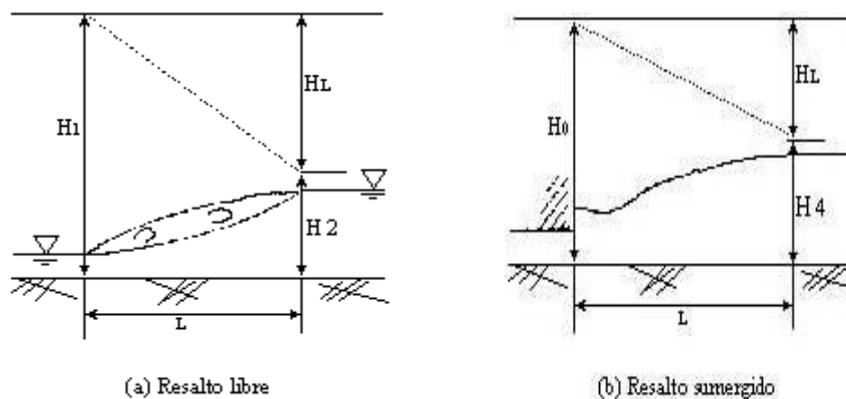


Figura 6.13. Relación entre L y H_L [Márquez 2006]

6.5.1. Resaltos hidráulicos libres

En el caso del resalto libre, la relación 6.33 puede ser expresada como:

$$f(L_j/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (6.34)$$

siendo L_j : longitud del resalto libre

También, L_{rj} : longitud del rulo y L_t : longitud total, se asumen como proporcionales a L_j :

$$L_{rj} \propto L_j \propto L_t \quad (6.35)$$

De las relaciones 6.34 y 6.35, se derivan las relaciones 6.36 y 6.37:

$$f(L_{rj} / H_L, H_L / H_1) = 0 \quad (6.36)$$

$$f(L_t / H_L, H_L / H_1) = 0 \quad (6.37)$$

De acuerdo con datos experimentales y con las relaciones 6.34, 6.36 y 6.37, Ohtsu et. al (1990) demostraron éstas claras correlaciones que se indican en la figura 6.19. Proponen las siguientes expresiones:

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,40; \quad \text{Para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.38)$$

$$\log_{10} \frac{L_j}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,58; \quad \text{Para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \text{ y } (0,14 \leq H_L/H_1 \leq 0,71) \quad (6.39)$$

$$\log_{10} \frac{L_t}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,72; \quad \text{Para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.40)$$

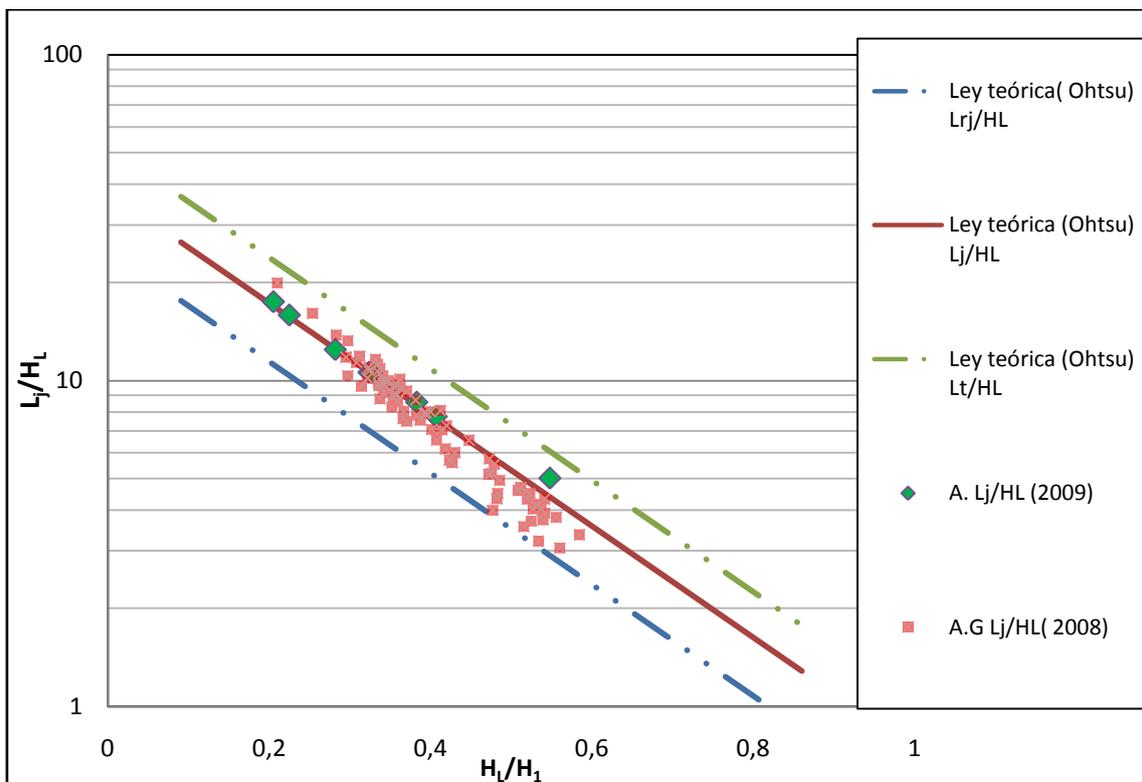


Figura 6.14. Relación entre L_j/H_L y H_L/H_1

Con respecto a los resultados que muestra la Figura 6.14 se puede hacer la siguiente interpretación: la pérdida de energía relativa más grande H_L/H_I se da cuando el remolino superficial y las fluctuaciones de la velocidad turbulenta son mayores; así, cuando el gradiente de la línea de energía H_L/L_j es mayor, entonces L_j/H_L será menor. Como contraste, la relación H_L/H_I más pequeña se corresponde con un remolino superficial y unas fluctuaciones de la velocidad turbulenta menores; así, H_L/L_j es menor mientras L_j/H_L es mayor. Comparando las leyes teóricas propuestas por Ohtsu et Al. con los resultados experimentales se observa que los datos experimentales para ambos resaltos siguen la misma tendencia y pendiente que las teóricas.

6.5.1 Resaltos hidráulicos sumergidos

En el caso del resalto sumergido, la relación 6.34 puede ser expresada de la siguiente forma:

$$f(L_{sj}/H_L, H_1/H_0) = 0 \quad (6.41)$$

Analizando los datos experimentales en base a la relación 6.52, se puede apreciar una clara correlación que se muestra en la figura 6.22, y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\log_{10} \frac{L_{sj}}{H_L} = -1.71 \frac{H_L}{H_0} + 1.58, \text{ para } (2,3 \leq F_0 \leq 10) \text{ y } (1 \leq y_3/y_0 \leq 20) \quad (6.42)$$

La ecuación 6.42 es idéntica a la ecuación 6.39 (resalto libre), constituyendo una expresión general que incluye el caso del resalto libre ($y_3/y_0=1$). El hecho de que las ecuaciones 6.42 y 6.39 sean idénticas tiene una explicación coherente dado que, como se ha demostrado en el apartado anterior, la pérdida de energía H_L en resaltos sumergidos es mayor que en resaltos libres y en consecuencia la longitud de resalto en los resaltos sumergidos será mayor que en los resaltos libres.

De acuerdo con la longitud del rulo L_{rsj} del resalto sumergido, si los datos experimentales de Rao y Rajaratnam (1963) se comparan con la relación 6.43, L_{rsj} puede también graficarse en la misma figura 6.15. Generalmente, se comprueba experimentalmente que $L_{rsj} \leq L_{sj}$, y para el caso de una gran inclinación superficial ($y_4/y_3 \geq 2$), L_{rsj} puede ser calculado desde la ecuación 6.44, que es la misma expresión que para la longitud del rulo del resalto libre (ecuación 6.38) debido a que, al comprobarse que la pérdida de energía H_L en los resaltos sumergidos es mayor que en los resaltos libres, la longitud de rulo L_{rsj} en los resaltos sumergidos también ha de ser mayor.

$$f(L_{rsj}/H_L, H_L/H_0) = 0 \quad (6.43)$$

$$\log_{10} \frac{L_{rsj}}{H_L} = -1.71 \frac{H_L}{H_0} + 1.40 \quad (6.44)$$

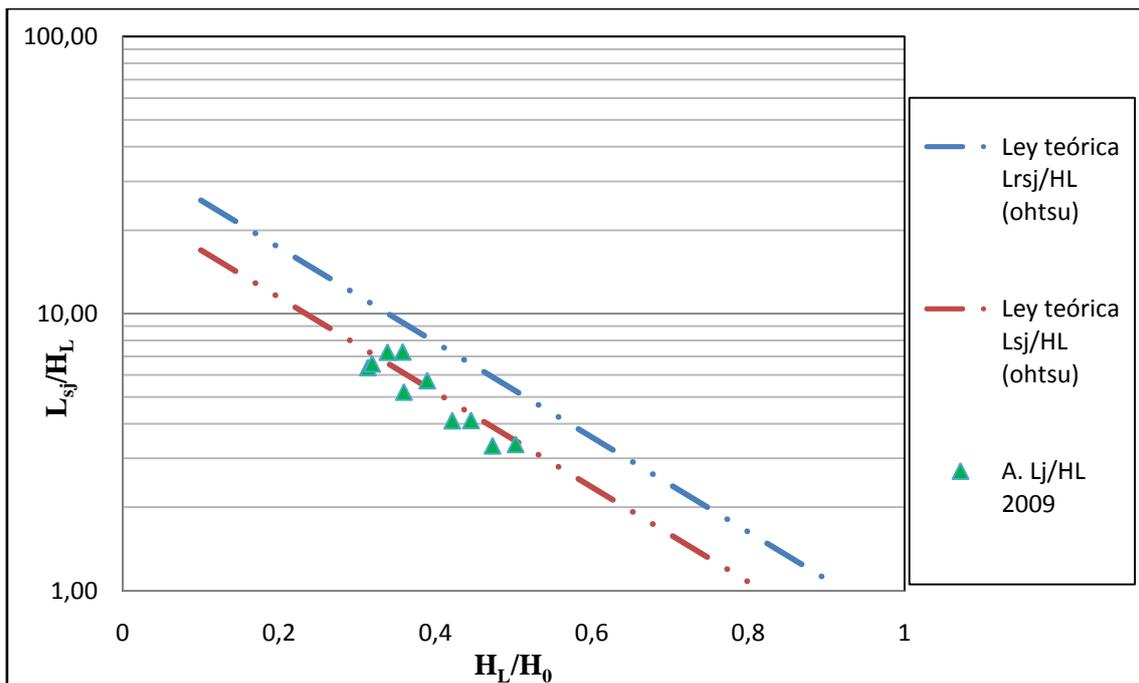


Fig. 6.15. Relación entre L_{sj}/H_L y H_L/H_0 en resaltos sumergidos

Analizando las leyes teóricas junto con los resultados obtenidos experimentalmente se observa que la nube de puntos experimentales para el caso del aliviadero sigue una misma tendencia, que en este caso coincide con la ley teórica de la longitud del rulo del resalto sumergido. Ello quiere decir que el criterio de longitud de resalto seguido en este

trabajo está subestimando la longitud real del resalto para el caso de resaltos sumergidos a pie del aliviadero. Esto se explica porque, como hemos dicho con anterioridad, hemos elegido la misma longitud de resalto tanto en libres como en sumergidos, y como hemos comprobado, la longitud del resalto sumergido es mayor que la del resalto libre, y por eso la relación nos da por debajo de la ley teórica.

6.6. Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos

Desde el punto de vista del diseño de disipadores de energía hidráulica, es importante conocer que el campo de velocidad en el resalto cambia con F_1 y las condiciones para el desarrollo de la capa límite, al comienzo del resalto libre.

Una investigación del campo de velocidades en el resalto fué llevada a cabo por Rajaratnam (1965), quien trató el resalto libre como chorro de pared, pero los cambios en las características de la velocidad dependientes de F_1 no han sido totalmente descritos. Considerando el hecho de que el resalto hidráulico es un fenómeno que implica un remolino superficial, se puede considerar el resalto como chorro de pared, sin tener en cuenta el efecto de la superficie libre. Considerando el efecto que el desarrollo de la capa límite en flujo supercrítico tiene en las condiciones del flujo del resalto, una investigación experimental fue llevada a cabo por Leutheusser y Kartha (1972), y por Wilson y Turner (1972). Sin embargo, la precisión de los instrumentos de medida debido a los pequeños valores medidos de los calados contraídos podrían haber perturbado en algún grado las medidas.

A continuación se investigan los cambios en las características de la velocidad de los resaltos en relación a F_1 .

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución semejante de velocidades independiente de F_1 y x dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ (Figura 6.16), donde la longitud escalar Y es la distancia perpendicular a la solera, en la que la velocidad \bar{u} es la mitad de la velocidad máxima u_m y el gradiente de velocidad es negativo, e $y_{m\acute{a}x}$ es la distancia perpendicular a la solera, en la que $\bar{u} = u_m$ (Figura 6.16).

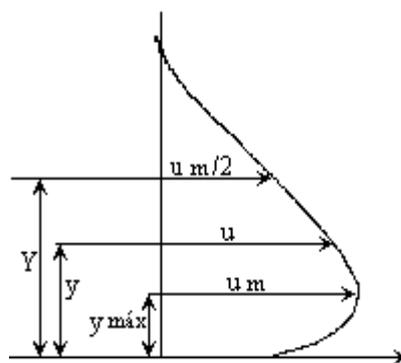


Figura 6.16. Definición esquemática de Y e $y_{m\acute{a}x}$ Márquez, (2006).

Esta distribución de velocidad se expresa por una ley de potencia, ecuación 6.45, y una ley exponencial, ecuación 6.46:

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left(\frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad (6.45)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left(\frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5 \quad (6.46)$$

donde

$$k = y_{m\acute{a}x} / Y$$

A continuación se resumen los coeficientes k y n para las ecuaciones anteriores en la Tabla 9; aportando los valores teóricos de Ohtsu para el Caso “a” (para flujo no desarrollado).

Distribución de Velocidad	K	n
Resalto libre y sumergido UPCT $2,5 \leq Fr \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$ $4 \leq y_4/y_0 \leq 10$	0.342	9.5
Resalto libre (caso “a”) Ohtsu et Al. $5 \leq Fr \leq 7,3$ $0,2 \leq x/L_{jc} \leq 0,7$	0.333	12

Tabla 9. Resumen de ecuaciones de distribución de velocidades.

Añadimos unos puntos teóricos siguiendo la formulación de Hagen & Vischer (1995) de velocidades máximas negativas para los puntos ubicados en la superficie del resalto.

Por medio de la ecuación 6.47 y la ecuación 6.48 y adimensionando.

$$u_s = U_s V_2 \quad (6.47)$$

$$U_s = -\textit{seno} \left(\frac{X+0.1}{0.35} \right) \quad (6.48)$$

Siendo X la posición dentro del resalto y V_2 la velocidad al final del resalto.

La ecuación dada por Hagen & Vischer (1995) tenía un pequeño error numérico y tuvimos que realizar una pequeña modificación a dicha ecuación (ecuación 6.49) y obtuvimos la ecuación 6.48.

$$U_s = -\textit{seno} \left(\frac{X+0.1}{1.1} \right) \quad (6.49)$$

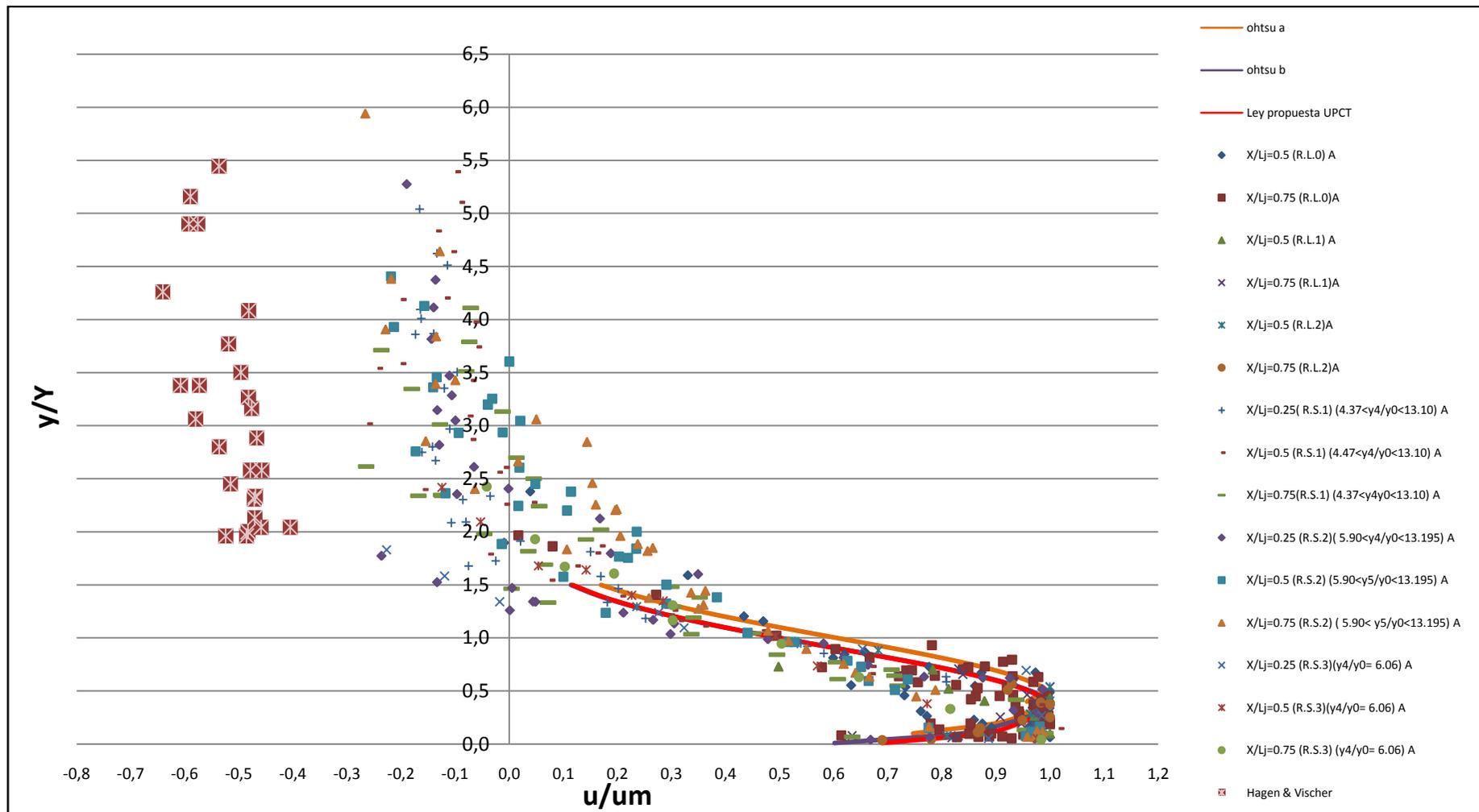


Figura 6.17. Distribución de velocidades analizada para los resaltos hidráulicos libres y sumergidos en aliviadero corregidos

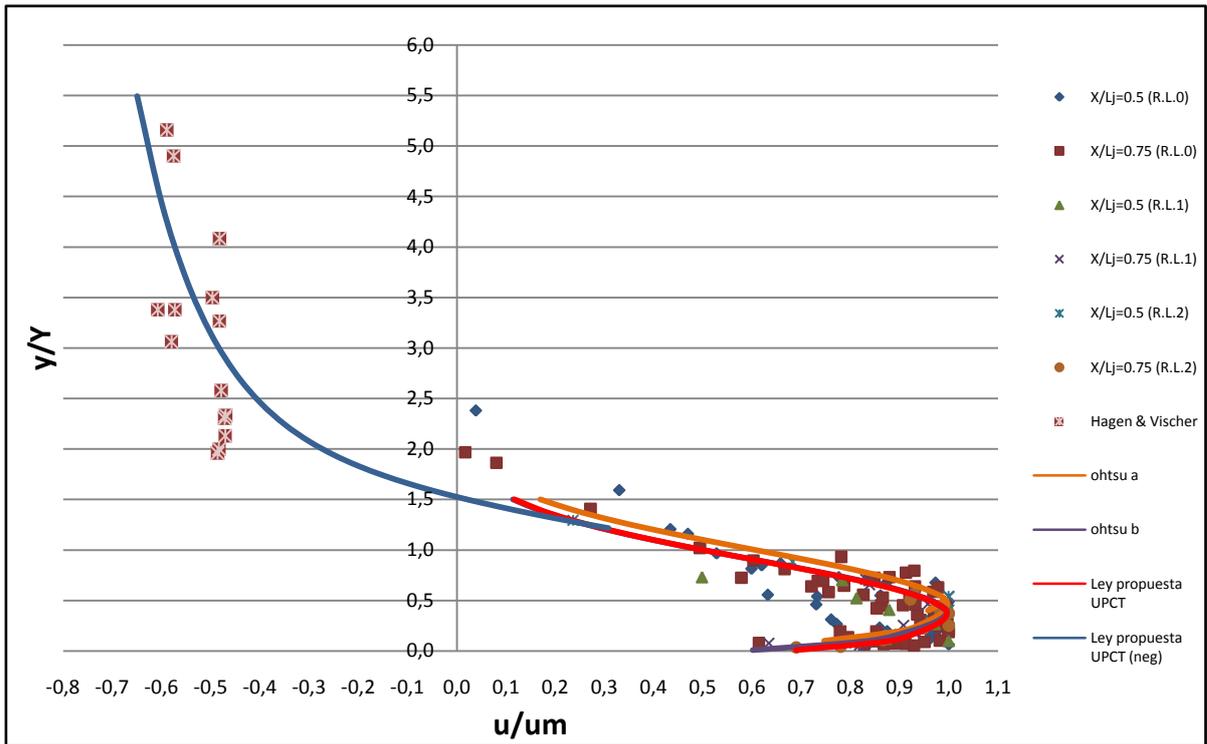


Figura 6.18. Distribucion de velocidades para resalto hidraulico libre en aliviadero.

Resaltos hidráulicos sumergidos.

Si la profundidad aguas abajo es lo suficientemente grande y la difusión del chorro no se ve afectada por la superficie libre, la condición de flujo puede ser tratada como un chorro de pared.

Si la profundidad aguas abajo disminuye tanto que la difusión del chorro se ve afectada por el remolino superficial, la condición de flujo se define como un resalto sumergido. Las características de velocidad del resalto sumergido se consideran idénticas al caso del resalto libre si la profundidad aguas abajo se acerca a y_2 (profundidad secante y_0).

Si los datos experimentales obtenidos en el flujo principal son tratados en base a la relación, se obtiene una ley de similitud para la distribución de velocidades dentro del rango $0,2 < x/L_{sj} < L_{rsj}/L_{sj}$, que se explica en la figura 6.19:

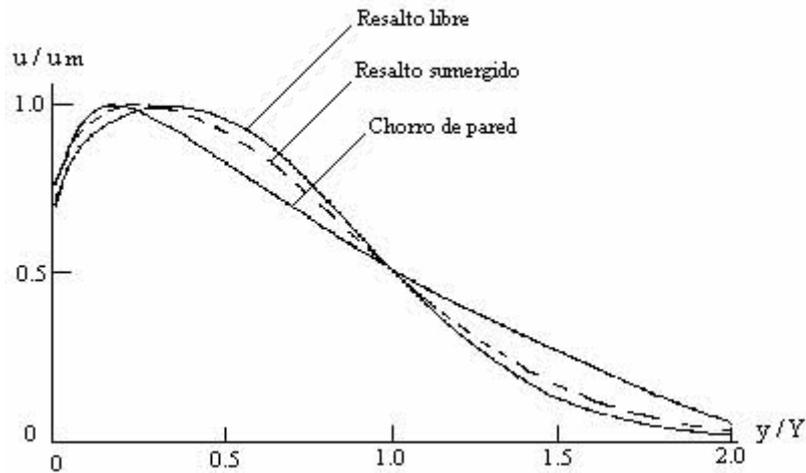


Figura 6.19. Ley de similitud para la distribución de velocidades (diagrama aclaratorio).

Los datos experimentales se explican por la ecuación de resalto libre si $y_4/y_0 \rightarrow y_2/y_0$.

$$\frac{u}{um} = 1,48 \eta^{\frac{1}{7}} [1 - \text{erf}(0.68 \eta)] \quad (6.50)$$

donde:

$$\eta = \frac{y}{Y}, \text{ siendo } Y \text{ la distancia perpendicular a la solera, en la que } u = \frac{um}{2}$$

erf es la función error siendo la ecuación 6.51

La función error es la función primitiva de la distribución de gauss o normal:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (6.51)$$

Esta función la hemos acotado para $x=0.68\eta$ para su límite inferior y 0 para su límite superior.

Para los datos utilizados tenemos algunos datos donde la relación y_4/y_0 es grande para aplicar la ecuación anterior; y otros en los que se asemeja a y_2/y_0 y aplicamos la ley del resalto sumergidos junto resaltos libres.

Para nuestro caso hemos representado en la figura 6.20 la ecuación 6.50, ya que tenemos resaltos donde la relación y_4/y_0 es grande. Por este motivo hemos representado los resaltos sumergidos separados de los resaltos libres.

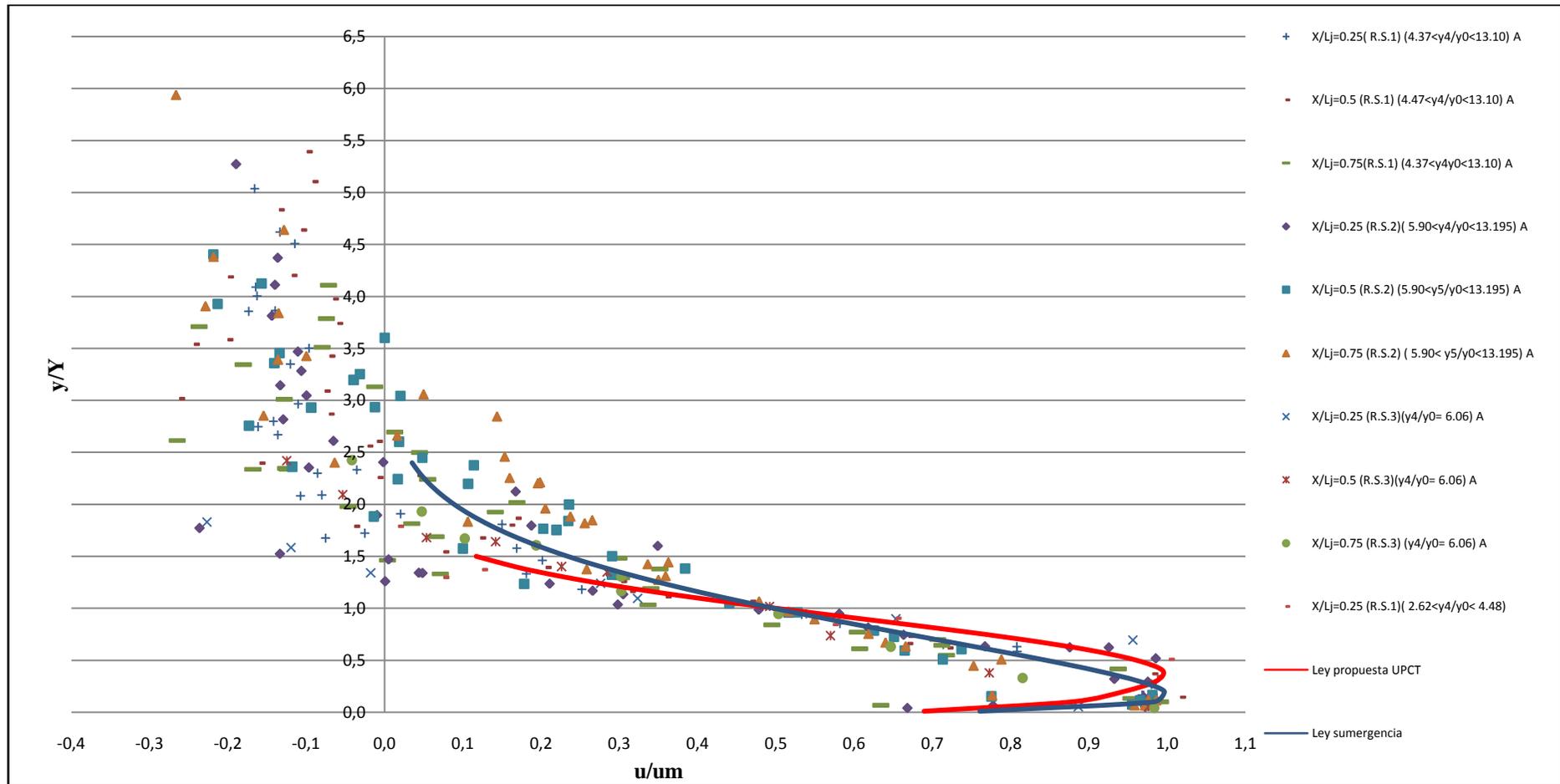


Figura 6.20. Distribucion de velocidades para resalto hidraulico sumergido en aliviadero.

Para la parte negativa de los resaltos sumergidos realizamos un ajuste, ya que al graficarlos nos daban una tendencia diferente a la de los resaltos hidráulicos libres.

Para el aliviadero tenemos la ecuación 6.52.

$$\frac{y}{Y} = e^{-6.116 \frac{u}{um}} + 1.1 \quad (6.52)$$

Este ajuste se representa en la figura 6.21.

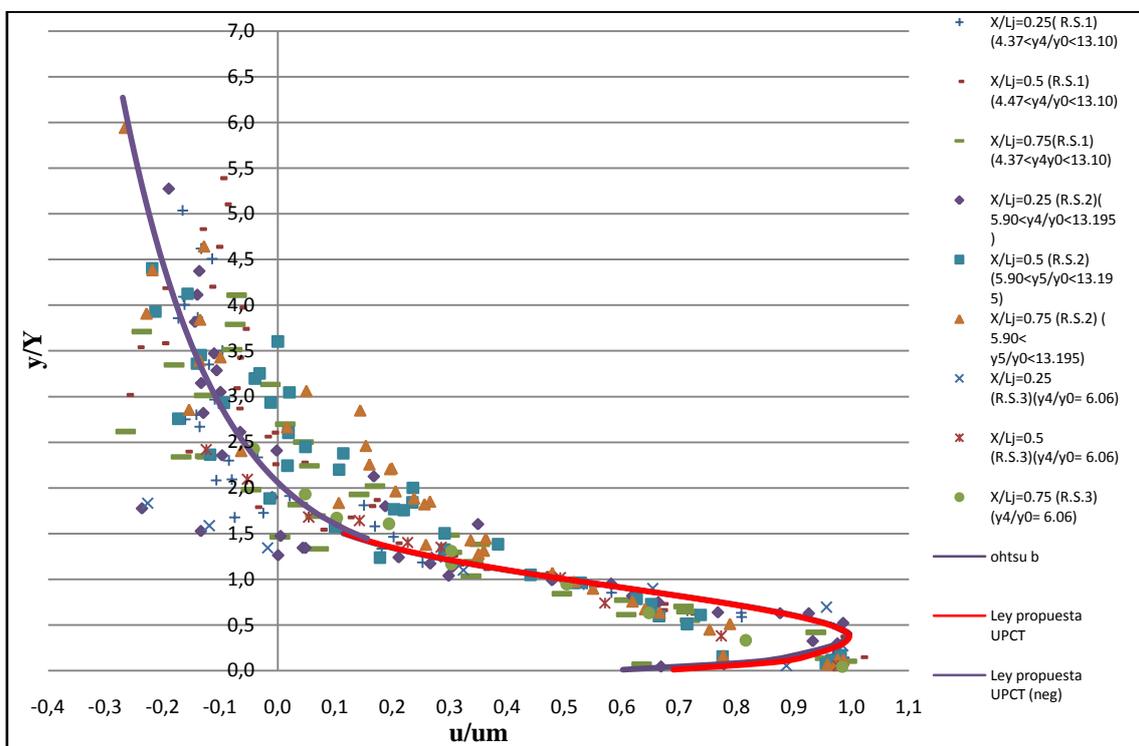


Figura 6.21. Distribución de velocidades para resalto hidráulico sumergido en aliviadero.

En resumen los ajustes obtenidos son los siguientes para resaltos libres son del tipo 6.53 y para resaltos sumergidos del tipo 6.54.

$$\frac{y}{Y} = a e^{-b \frac{u}{um}} + c e^{-d \frac{u}{um}}, 0,1 < \frac{u}{um} \leq 0,6 \quad (6.53)$$

$$\frac{y}{Y} = f e^{-g \frac{u}{um}} + h, 0,1 < \frac{u}{um} \leq 0,3 \quad (6.54)$$

Distribución de velocidades negativas	a ó f	b ó g	c ó h	d
Resalto libre	1.5	0.7	0.0224	7.46
Resalto sumergido	1	6.116	1.1	

Tabla 10. Resumen de coeficientes de las ecuaciones de distribución de velocidades negativas.

6.6.1. Caída de velocidad máxima.

6.6.1.1. Resaltos hidráulicos libres.

Hemos representado en la figura 6.27 la relación $u_m/v_1 = f(x/y_1, F_1)$, que fue obtenida por Ohtsu et Al., proponiendo la siguiente ecuación:

$$u_m/v_1 = (0,175F_1 + 1,57)/\sqrt{x/y_1} ; \text{ para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.55)$$

La ecuación anterior es aplicable en la zona del resalto, dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$

En la figura 6.22 se representan las leyes teóricas para cada Froude según la ecuación 6.55, junto con nuestros resultados experimentales, y se observa que los puntos medidos quedan por debajo de las líneas teóricas correspondientes, por lo tanto no se puede considerar el ajuste teórico-experimental como bueno. Se puede observar que nuestros valores experimentales caen asintóticamente por debajo de la relación propuesta por Ohtsu et. al (1990), concluyendo que la relación de velocidades máximas registradas para la velocidad contraída, son en media un 40% inferiores a las propuestas por Ohtsu.

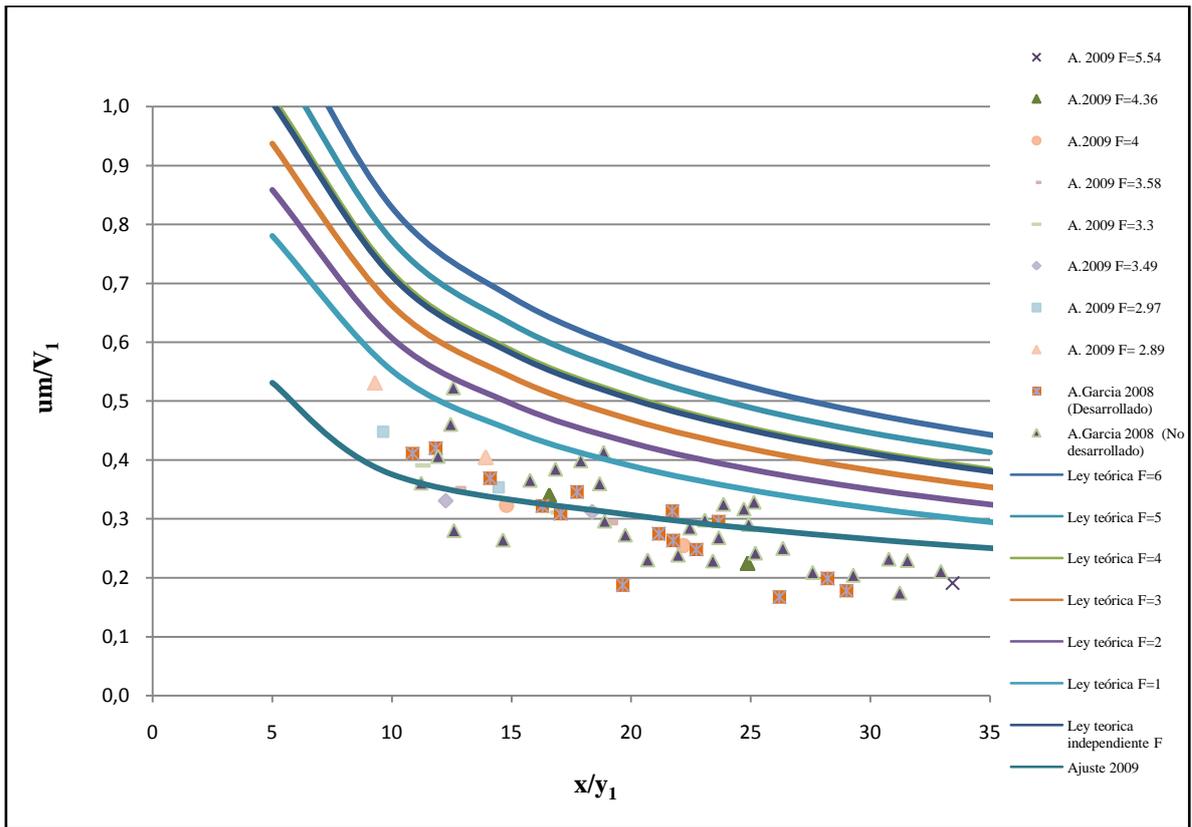


Figura 6.22. Caída máxima de velocidad.

Con respecto a la relación Y/y_1 para X/y_1 no se obtiene una clara relación para ninguna de nuestras experiencias debido a la dispersión que muestran los datos. La relación propuesta por Ohtsu et Al es:

$$Y / y_1 = (0,330 / \sqrt{F_1}) x / y_1; \text{ para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.56)$$

Se ha representado la ley teórica para los resaltos libres según la ecuación 6.56 (ya que los resaltos son parcialmente desarrollados) y para todos los números de Froude que se encuentran en nuestro rango de trabajo.

También se ha representado la ley teórica correspondiente a los resaltos sumergidos según la ecuación 6.68, la cual es independiente del número de Froude. Junto a estas leyes teóricas se han representado los resultados obtenidos experimentalmente para los resaltos libres y los resaltos sumergidos. Según las bases teóricas las medidas experimentales para nuestros resaltos sumergidos deberían ajustarse más a la ley teórica correspondiente a resaltos libres porque los parámetros medidos y_4/y_0 en los resaltos sumergidos ensayados no son lo suficientemente grandes ($y_4/y_0 < 20$), concretamente ($4 \leq y_4/y_0 \leq 14$) y deberían acercarse más al caso del resalto libre. Pero en la gráfica se

puede observar que no ocurre exactamente así, sino que los valores experimentales son muy dispersos y se ubican entre la ley teórica para el resalto libre y la ley teórica para el resalto sumergido.

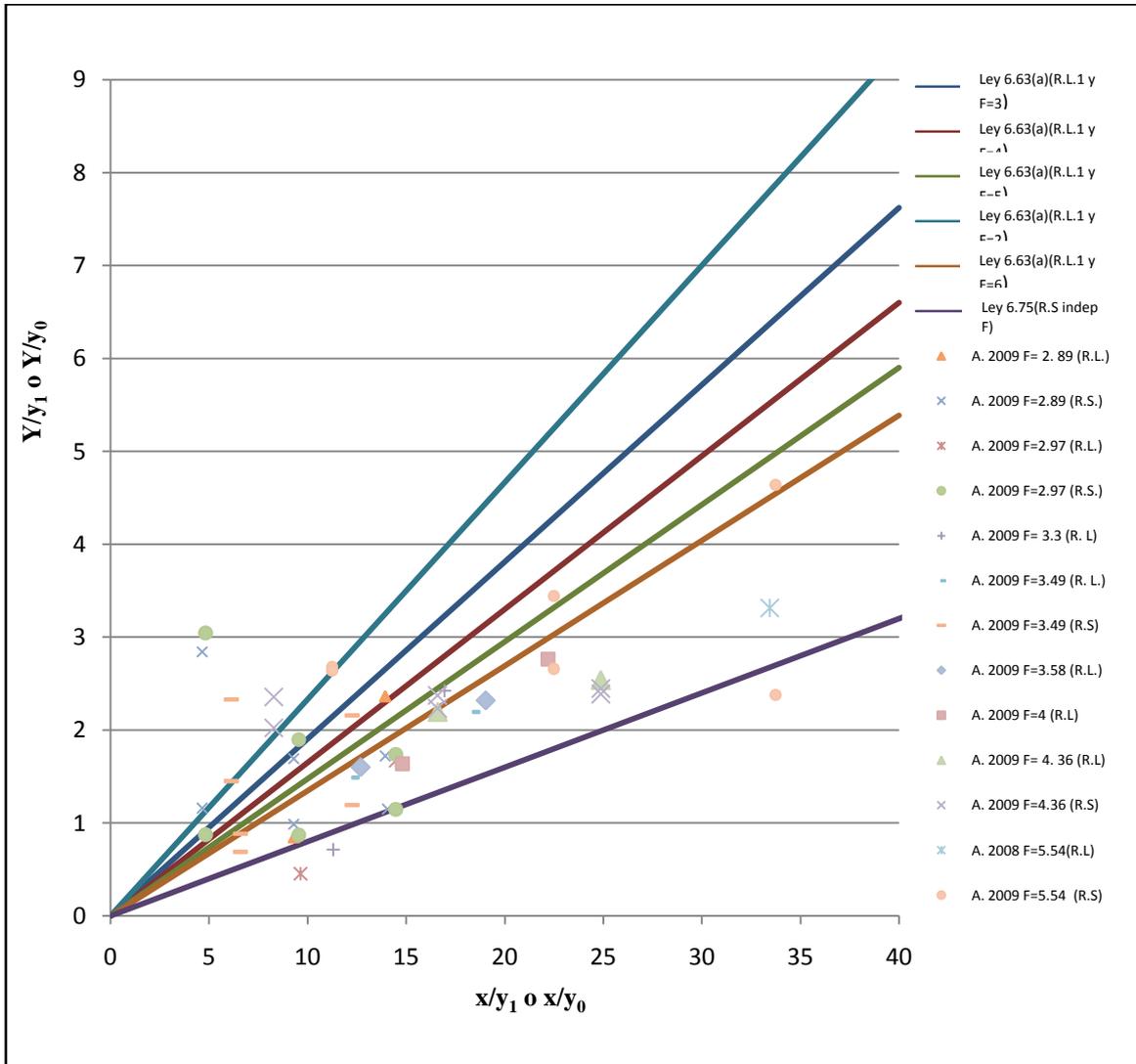


Figura 6.23. Relación $Y/y_1 = f(x/y_1)$ (resalto libre) ó $Y/y_0 = f(x/y_0)$ (resalto sumergido)

Con respecto a $y_{m\acute{a}x}$, dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$, se puede aplicar la ecuación 6.57.b para el Caso “b”, comparable con nuestro R.L.0 estabilizado al pie de la compuerta (Figura 6.24):

$$y_{m\acute{a}x}/y_1 = (0,110/\sqrt{F_1}) x/y_1, \quad (6.57)(a)$$

$$y_{m\acute{a}x}/y_1 = (0,130/\sqrt{F_1}) x/y_1, \quad (6.57)(b)$$

Los valores de Y e $y_{m\acute{a}x}$ llegan a ser repentinamente más grandes para $x > L_{rj}$ (de acuerdo con $x/L_j > 0,7$).

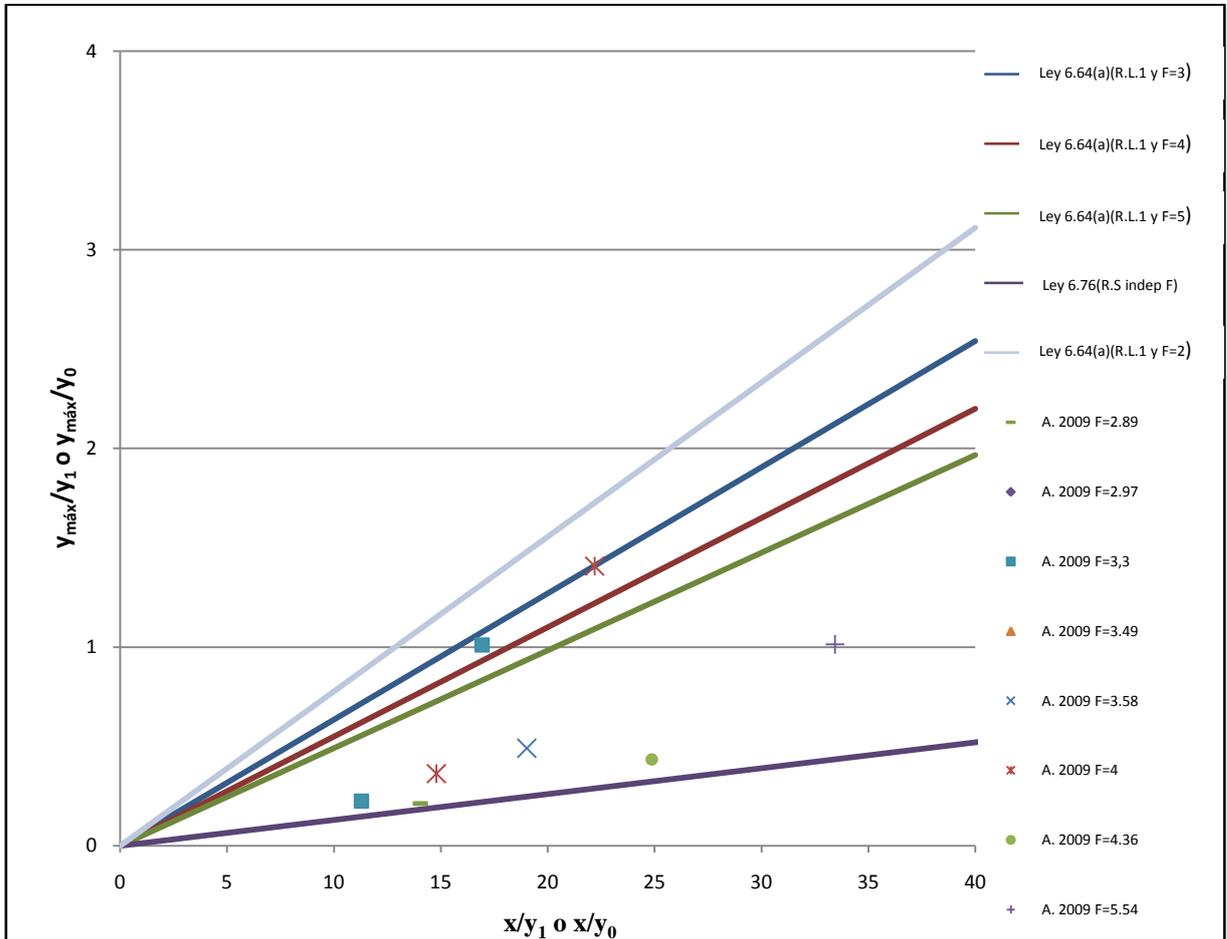


Figura 6.24. Relación $y_{m\acute{a}x}/y_1 = f(x/y_1)$ (resalto libre) ó $y_{m\acute{a}x}/y_0 = f(x/y_0)$ (resalto sumergido)

Se han representado las leyes teóricas para los resaltos libres según la ecuación 6.57.a para todos los números de Froude que se encuentran en nuestro rango de trabajo y junto a ésta se ha representado la ley teórica correspondiente a los resaltos sumergidos según la ecuación 6.69 (independiente del número de Froude).

Comparándolas con los resultados obtenidos experimentalmente para los resaltos libres y los resaltos sumergidos creados se observa que los valores medidos se encuentran entre el caso teórico para resaltos libres y el caso teórico para resaltos sumergidos.

Según las bases teóricas, los resultados para los resaltos sumergidos deberían ajustarse más a la ley teórica correspondiente a resaltos libres por el mismo motivo que en la figura anterior: los parámetros medidos y_4/y_0 en los resaltos sumergidos ensayados no son lo suficientemente grandes ($y_4/y_0 < 20$) como para tratarlos como tal, y se podrían considerar comparativamente como resaltos libres.

Si se comparan la figura 6.23 con la figura 6.24 se observa que se obtiene un mejor ajuste de los datos experimentales con los teóricos esperados en el caso de la figura 6.24. Esto se debe a que la distancia $y_{máx}$, en la que $\bar{u} = u_m$, se obtiene directamente de los perfiles de velocidad medidos en nuestro laboratorio, mientras que la distancia Y , en la que $\bar{u} = u_m/2$, es un valor estimado en muchos casos, ya que muchos perfiles medidos no alcanzan suficiente calado como para obtener con exactitud la distancia Y .

A partir de haber obtenido una ley de similitud para la distribución de velocidades, como se muestra en el apartado anterior, se intenta dar una explicación de este punto a continuación:

Examinando las condiciones para obtener dicha ley de similitud en base a la ecuación del movimiento, es necesario satisfacer las ecuaciones 6.58, 6.59 y 6.60:

$$u_m \propto x^\alpha \quad (6.58)$$

$$Y \propto x \quad (6.59)$$

$$\frac{dy}{dx} / \left(\frac{u_m}{\sqrt{gY}} \right)^2 = 0 \text{ ó } \textit{valor constante} \quad (6.60)$$

Desde que las ecuaciones 6.55 y 6.56 son aplicables dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$, concuerdan aproximadamente con las relaciones 6.58 y 6.59.

En otras palabras, cuando las relaciones 6.58, 6.59 y 6.60 son satisfechas aproximadamente dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$, se ha obtenido una ley de similitud para la distribución de velocidades.

El resultado de los datos experimentales, considerando la distribución de velocidades al final del resalto aguas abajo ($x=L_{jc}$), usando la relación 6.61, se muestra en la figura 6.25.

$$\bar{u}/v_2 = f(y, y_2) \tag{6.61}$$

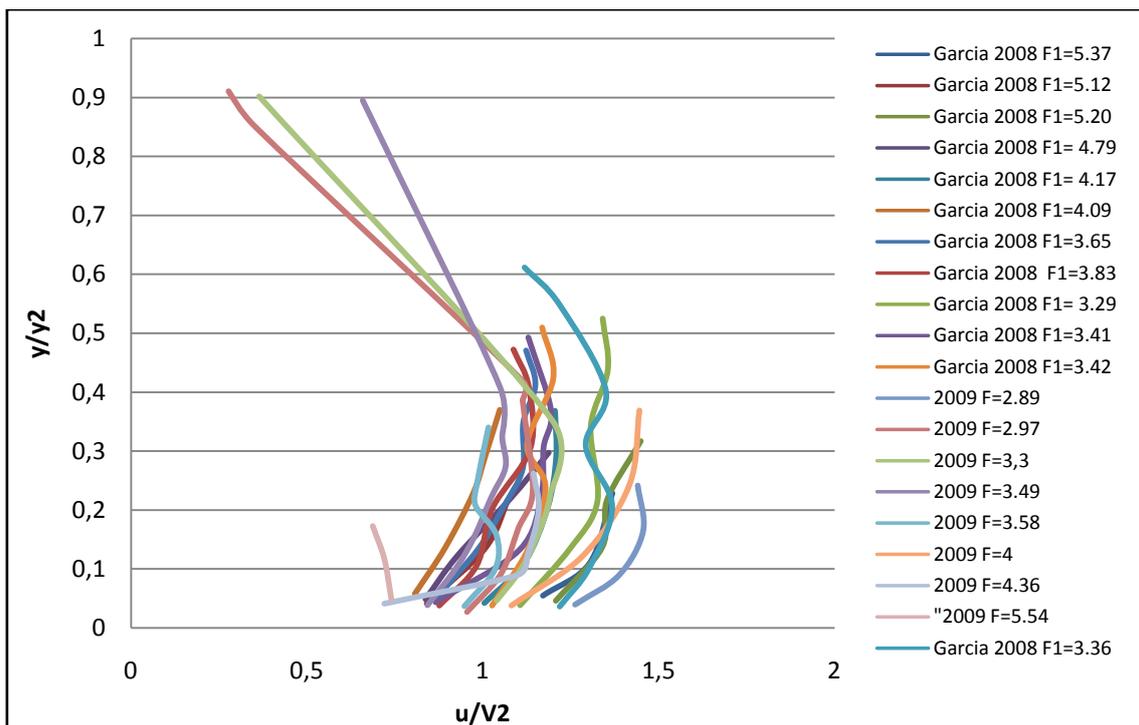


Figura 6.25. Distribución de velocidades en la última sección en aliviadero.

6.6.1.2. Resaltos hidráulicos sumergidos.

La relación 6.62 se muestra en la Figura 6.26 para valores dados de F_0 .

$$u_m/v_0 = f(x/h_0) \tag{6.62}$$

La caída de u_m para el resalto sumergido está entre el caso de chorro de pared y el caso de resalto libre. En otras palabras, si la profundidad aguas abajo y_4/y_0 es lo suficientemente grande, tanto que $y_4/y_0 > 20$ (en este caso, la superficie del agua es casi

horizontal y $y_3/y_0 = y_4/y_0$), la caída de u_m coincide con el caso de chorro de pared, como indica la ecuación 6.63:

$$u_m/v_0 = 3,48(x/h_0)^{-0.50} \quad (6.63)$$

Si la profundidad y_4/y_0 disminuye e $y_4/y_0 < 20$, la caída de u_m descrita por la ecuación 6.64 se transforma en la relación 6.65:

$$\frac{u_m - V_4}{V_0} = 0,0855 - 1,114 \log_{10} \left(\frac{x}{L_{sj}} \right) \quad (6.64)$$

$$u_m/v_0 = f(x/y_0, F_0) \quad (6.65)$$

Además, si $y_4/y_0 \rightarrow y_2/y_0$, la caída de u_m coincide con el caso de resalto libre (ecuación 6.54). En los casos experimentales en los que se ha trabajado, $y_4/y_0 < 20$, por lo que en la figura 6.26, que aparece a continuación, los resaltos sumergidos deberían ajustarse a la ley teórica representada para el caso de los resaltos libres.

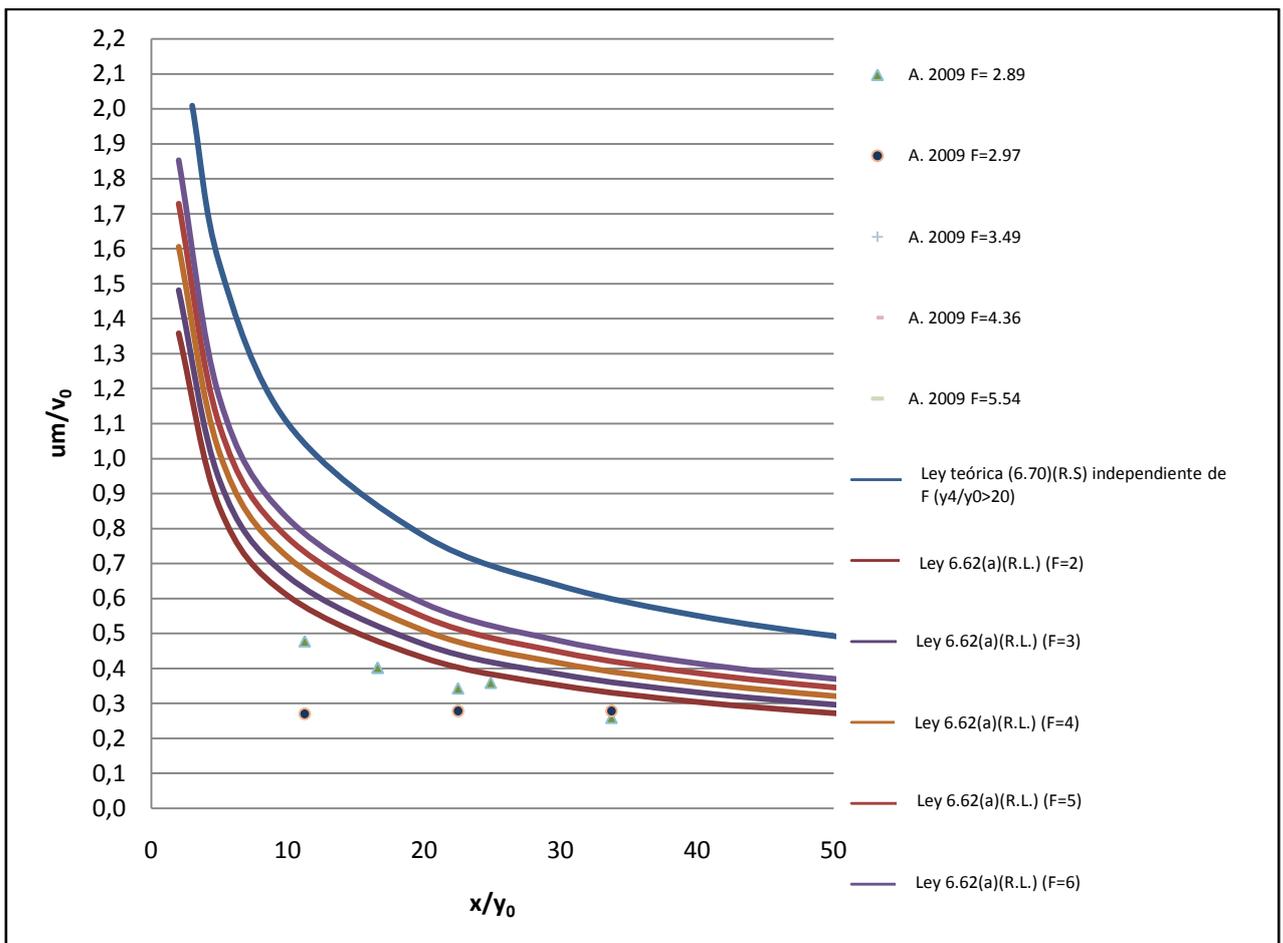


Figura.6.26. Caída de velocidad máxima en resaltos sumergidos: $u_m/v_0 = f(x/y_0, F_0)$

Para cada número de Froude se ha representado la ley teórica correspondiente al resalto libre (ecuación 6.55), la ley teórica correspondiente al resalto sumergido (ecuación 6.63) y los resultados experimentales obtenidos en los resaltos sumergidos. Como se puede observar en las gráficas los resultados experimentales se ajustan mejor a la caída de velocidad correspondiente a un resalto libre dado que nuestros valores de y_4/y_0 son menores a 20. Esta observación coincidiría con las bases teóricas explicadas anteriormente. Aún así se observa que la caída de velocidad máxima obtenida experimentalmente tiende a ser inferior a la teórica para todos los Froude ensayados.

Se graficó el ajuste realizado por Márquez (2006) para resaltos sumergidos en un rango $4 \leq y_4/y_0 \leq 15$. La ley propuesta representada en la figura 6.27 es la ecuación 6.66:

$$\frac{u_m}{v_0} = 4 \left(\frac{x}{y_0} \right)^{-0.78} \quad (6.66)$$

En la figura 6.27 también se ha representado la relación 6.67 clasificando los valores experimentales de caída de velocidad máxima en los resaltos sumergidos en función de su valor y_4/y_0 , junto con la ecuación 6.63 de los resaltos sumergidos.

$$u_m/v_0 = f(x/y_0, y_4/y_0) \quad (6.67)$$

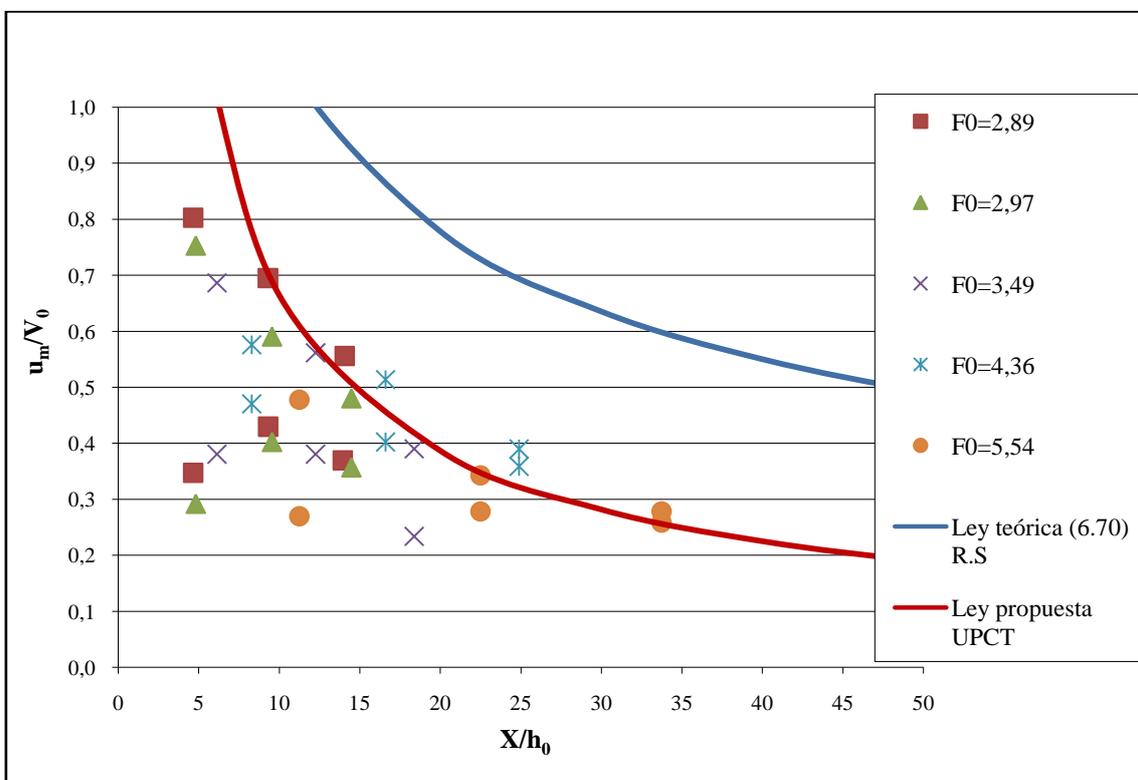


Figura 6.27 Caída de velocidad máxima en resaltos sumergidos: $u_m/v_0 = f(x/y_0, y_4/y_0)$

El cambio de Y e $y_{m\acute{a}x}$ también coincide con el caso de chorro de pared (ecuación 6.68 y 6.69) si y_4/y_0 es lo suficientemente grande ($y_4/y_0 \geq 20$), y se acerca al caso del resalto libre (ecuación 6.56, ecuación 6.57.b) si $y_4/y_0 \rightarrow y_2/y_0$, como debe ocurrir en los casos experimentales en los que se ha trabajado. Los resultados se muestran en las figuras 6.22 y 6.23 anteriormente representadas junto a los casos de resaltos libres.

$$Y/y_0 = 0,080 x/y_0 \quad (6.68)$$

$$y_{m\acute{a}x}/y_0 = 0,16 Y/y_0 = 0,013 x/y_0 \quad (6.69)$$

Como se menciona arriba, cuando la profundidad y_4/y_0 es lo suficientemente grande ($y_4/y_0 > 20$), la difusión del chorro no se ve afectada por el remolino superficial y este caso es tratado como un chorro de pared antes que como un resalto sumergido.

A partir de haber obtenido una ley de similitud para la distribución de velocidades para un F_0 dado e y_4/y_0 , como se muestra en campos de velocidades apartado 6.6, se da una explicación de este punto a continuación:

Se confirma que $u_m \propto 1/\sqrt{x}$ e $Y \propto x$ dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ y donde las Ecs. 6.58, 6.59 y 6.60: son casi satisfechas, y se obtiene una ley de similitud para la distribución de velocidades.

6.7. Descomposición frecuencial del espectro de turbulencia de las series de velocidades.

6.7.1. Introducción.

Para una correcta adquisición, procesamiento e interpretación, de los datos de laboratorio necesitamos técnicas especiales, las cuales se denominan “Técnicas de Tratamiento de Señales”.

Hay diversas técnicas de procesamiento de señales y que se han desarrollado para la detección y la estimación.

La detección es la técnica que determina si una señal específica está presente en una observación, mientras que con la estimación se obtienen los valores de los parámetros que describen la señal

Para facilitar la detección y la estimación de sistemas de señales, acudimos al análisis armónico de datos de extensión finita. La transformada de Fourier, es el mecanismo por el cual somos capaces de realizar la descomposición frecuencial.

En este caso, hemos decidido usar como herramienta de análisis el método convencional de la transformada rápida de Fourier (FFT), ya que se realiza sencillamente con el PC y nos da una información muy buena para nuestros propósitos.

A continuación describiremos los elementos básicos de una transformada de Fourier, tanto para parámetro continuo como discreto, por medio de la cual vamos a ser capaces de realizar una correcta adquisición de los datos del laboratorio.

6.7.2. Transformada de Fourier.

El análisis de las frecuencias de los procesos estocásticos, se fundamentan en el concepto de la transformación de Fourier. Por lo tanto, a continuación presentamos los elementos básicos de las transformadas de Fourier.

6.7.2.1. Transformadas de Fourier de parámetro continuo (CFT).

Dada una función $x(t)$ de cuadrado integrable, es decir, la integral

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$$

Es convergente; se define su transformada de Fourier como:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (6.70)$$

Y se restituye la función original $x(t)$ mediante la transformación inversa.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d(\omega) \quad (6.71)$$

En donde ω es la frecuencia en radianes por segundo (rad/s).

El par de transformadas de Fourier en función de la frecuencia en Hertz (Hz)
 $\omega = 2\pi f$ tenemos:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (6.72)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i2\pi ft} d(\omega) \quad (6.73)$$

El módulo cuadrado de la transformada de Fourier $|X(\omega)|^2$, se llama espectro de energía de $x(t)$.

El teorema de Parseval, expresado como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega \quad (6.74)$$

nos define que la energía de una señal en el dominio del tiempo, es igual a la energía de su transformada en el dominio de la frecuencia. Así $|X(\omega)|^2$ representa la distribución de la energía como una función de la frecuencia.

Entre las propiedades más importantes de la transformada de Fourier, destaca el comportamiento de la convolución de dos funciones, cuya transformada es el producto de las respectivas transformadas: si definimos la convolución de las funciones x y g como:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (6.75)$$

entonces:

$$H(\omega) = X(\omega)G(\omega) \quad (6.76)$$

Es decir, la convolución de las funciones en el tiempo, corresponde a su producto en el dominio de la frecuencia.

6.7.2.2 Transformadas de Fourier de parámetro discreto (DFT).

En la práctica, las señales se presentan muestreadas a intervalos de tiempo constante, T , para permitir su posterior tratamiento en un ordenador. En tal caso se obtiene una sucesión numérica producida por el muestreo de $x(t)$:

$$\dots, x_0 = x(0), x_1 = x(T), \dots \dots x_n = x(nT), \dots$$

Conviene en ese caso utilizar el concepto de transformada discreta de Fourier (DFT) $\tilde{X}(\omega)$, definida de la siguiente forma:

$$\tilde{X}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{-i\omega nT} \quad (6.77)$$

Donde: $\omega \in [-\omega_c, \omega_c]$; $\omega_c = \frac{\pi}{T}$

Y su transformada inversa:

$$x_n = \frac{T}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \tilde{X}(\omega) e^{i\omega nT} d\omega \quad (6.78)$$

El par de transformadas de Fourier, en función de la frecuencia en (Hz), vienen definidas por:

$$\tilde{X}(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{-i2\pi f nT} \quad (6.79)$$

Y su transformada inversa:

$$x_n = T \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \tilde{X}(f) e^{i2\pi f nT} df \quad (6.80)$$

Aunque se especifica que \tilde{X} está definida en $[-\omega_c, \omega_c]$, la fórmula (6.77) define una función periódica de periodo $(2\pi/T)$, hecho que será utilizado frecuentemente, para el cálculo, que se realiza en un intervalo $[0, 2\omega_c]$.

La propiedad de la convolución es análoga a la de la transformación de Fourier. Si utilizamos las mayúsculas con tilde para designar las transformadas discretas de Fourier, tenemos que la convolución $\{h_n\}$ de las sucesiones $\{x_n\}$, $\{g_n\}$.

$$h_n = \sum_{j=-\infty}^{\infty} x_n g_{n-j} \quad (6.81)$$

Tiene como transformada:

$$\tilde{H}(\omega) = \tilde{X}(\omega)\tilde{G}(\omega) \quad (6.82)$$

También conocida como Convolución Circular de las transformadas, goza de la siguiente propiedad:

Si definimos

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \tilde{X}(\omega_1)\tilde{G}(\omega - \omega_1)d\omega_1 \quad (6.83)$$

Entonces

$$h_n = x_n g_n \quad (6.84)$$

Es decir, en la convolución circular de las transformadas de las secuencias x_n y g_n , corresponden a un producto en el dominio del tiempo.

En la ecuación 6.83, se ha considerado $\tilde{X}(\omega)$ y $\tilde{G}(\omega)$ periódicas, de período $2\omega_c$.

No obstante, la transformada discreta de Fourier 6.77 es impracticable generalmente ya que solo se conocerán un número N , limitado, de puntos de sucesión $\{x_n\}$.

Suponemos que conocemos los puntos $x_0, \dots, \dots, x_{N-1}$ y construimos una nueva sucesión $\{y_n\}$, dada por:

$$y_n = \omega_n x_n \quad (6.85)$$

Donde $\{\omega_n\}$, conocida con el nombre de ventana temporal, cumple:

$$\omega_n = 0 \text{ si } n < 0 \text{ ó } n \geq N \quad (6.86)$$

Si $\omega_n = 1, n = 0, 1, \dots, N-1$; se dice que $\{\omega_n\}$ es una ventana rectangular.

Definimos como transformada discreta finita de Fourier (DFFT) de $\{x_n\}$. Cuando $\{\omega_n\}$ es la ventana rectangular y se muestra a intervalos fijos de frecuencia $\Omega = 2\pi/NT$.

Se obtiene entonces el par de transformadas limitadas.

$$X_N(k\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\Omega Tnk}; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.87)$$

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_N(n\Omega) e^{i\Omega Tnk}; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.88)$$

Debe observarse que $X_N(k\Omega) = X_N[(k + N_j)\Omega]$, siendo j un número entero cualquiera.

Por ello, cuando $k\Omega$ supera a ω_c , es decir, k es mayor a $N/2$, los valores de X_N corresponden a las frecuencias negativas dadas por $(k - N)\Omega$.

En lo que sigue, adoptamos la notación de 6.87 y 6.88, sin mencionar este hecho.

La DFFT tiene la propiedad de convolución:

$$\sum_{k=0}^{N-1} x_n g_{n-k} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X_n(j\Omega) G(j\Omega) e^{i\Omega Tjn} \quad (6.89)$$

Es decir, la transformada limitada de la convolución de las sucesiones (limitadas), es el producto de las respectivas transformadas limitadas.

Es muy importante observar que el cálculo de la DFT del producto de $\{x_n\}$, equivale a la DFT del producto de $\{x_n\}$ por la ventana $\{\omega_n\}$ por los que las propiedades 6.83 y 6.84 nos indican que, la DFFT es la convolución circular de la DFT de $\{\omega_n\}$ con la ventana, circunstancia que es aprovechada en el cálculo para mejorar la precisión de estimas.

El teorema de Parseval aplicado a la transformada finita discreta de Fourier (DFFT), nos expresa en forma análoga al caso continuo, que:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |X_N(n\Omega)|^2 \quad (6.90)$$

En donde

N ...Número de datos muestreados

Ω ...Intervalo de frecuencia

Por lo tanto, la energía de una señal muestreada en el tiempo, es igual a la energía de su DFFT, en frecuencia; donde $|X_N(N\Omega)|^2$ representa la distribución de la energía en función de la frecuencia.

6.7.3. Análisis de la turbulencia de las series de velocidades mediante la Transformada Rápida de Fourier.

6.7.3.1. Transformada Rápida de Fourier. Aplicación

La transformada rápida de Fourier se utiliza para calcular la transformada discreta de Fourier con ordenadores normales.

La *FFT* se caracteriza en que debe contener un número de muestras igual a una potencia de dos (2^n).

Las funciones son calculadas con un intervalo de tiempo entre medida y medida que es función de la frecuencia en Hz, $T=1/f$, siendo f la frecuencia de la medición en Hz.

Como queremos analizar la turbulencia, utilizaremos las velocidades fluctuantes en el eje x (V_x') y en el eje y (V_y'), y la componente cortante resultante de ambas ($V_x'V_y'$)

$$V_{xi}' = V_{xi} - \bar{V}_x \quad (6.91)$$

$$V_{yi}' = V_{yi} - \bar{V}_y \quad (6.92)$$

siendo

V_{xi} la velocidad en el eje X en el instante i

V_{yi} la velocidad en el eje Y en el instante i

A dichas velocidades fluctuantes les haremos el análisis de Fourier y serán las que centren nuestro estudio.

Una vez hecha la FFT se graficarán los espectros obtenidos. Para realizar estos gráficos sólo utilizamos los $N/2+1$ primeros datos, ya que según el teorema del muestreo de Nyquist, para una frecuencia dada, los datos obtenidos para la primera mitad de la frecuencia $f/2$ son simétricos a los de la otra mitad de la frecuencia.

6.7.3.2. Análisis de las señales.

Para analizar las señales obtenidas nos basaremos en el concepto de Kolmogoroff (1941), en el cual se dice que el espectro de energía debe contener un subrango de producción de baja frecuencia, seguido por un subrango de inercia caracterizado por

una pendiente de $-5/3$ representada en una gráfica log-log, y un rango viscoso de alta frecuencia con pendientes del espectro de energía mayores a $-5/3$ (hasta $-7/3$).

El análisis lo haremos para frecuencias de 5Hz, 25Hz y 50Hz para hacer comparaciones. El caudal utilizado ha sido el $Q_{\text{caudalimetro}}=8.5 \text{ m}^3/\text{h}$ y hemos tomado como puntos de referencia los siguientes:

- Un punto en la sección 3, dentro del resalto, a una distancia de la solera entre 0.35 y 0.55 cm. Se tomarán medidas a 5, 25 y 50 Hz tanto en el resalto libre como en el resalto sumergido en el mismo punto.
- Otro punto en la sección 5, fuera del resalto, a una distancia de la solera entre 0.35 y 0.55 cm. Se tomarán medidas a 5, 25 y 50 Hz tanto en el resalto libre como en el resalto sumergido en el mismo punto.

Hemos intentado que los puntos estén todos a la misma altura para hacer las comparaciones pertinentes.

Con todo esto tenemos un total de 12 series de velocidades tomadas para realizar nuestro análisis.

6.7.3.2.1. Análisis de las velocidades fluctuantes en el eje X (V_x'), en el eje Y (V_y') y la cortante entre ambos ($V_x'V_y'$)

Para los tres casos V_x' , V_y' y $V_x'V_y'$, tenemos que tanto en el resalto libre como en el sumergido hay unas características similares en cuanto a energía se refiere, ya que se observa que conforme va aumentando la frecuencia, aumenta la energía. Así para una frecuencia de 5Hz la densidad espectral es menor que para 25Hz y ésta es menor que para 50Hz. Esto ocurre tanto en la sección 3 (dentro del resalto), como en la sección 5 (fuera del resalto).

Esto podemos comprobarlo en las figuras (6.33), (6.34) y (6.35).

Siendo:

S_x' la densidad espectral de la velocidad fluctuante V_x'

S_y' la densidad espectral de la velocidad fluctuante V_y'

$S_{x'y}'$ la densidad espectral de la velocidad cortante $V_x'V_y'$

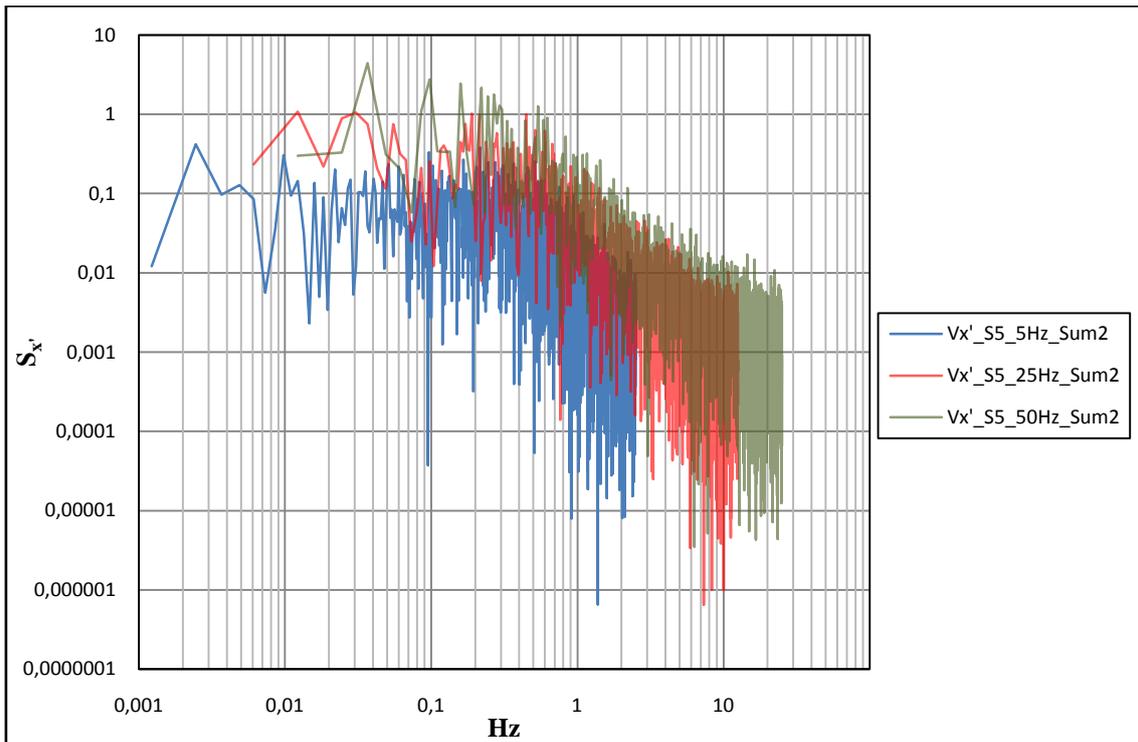


Figura 6.28. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

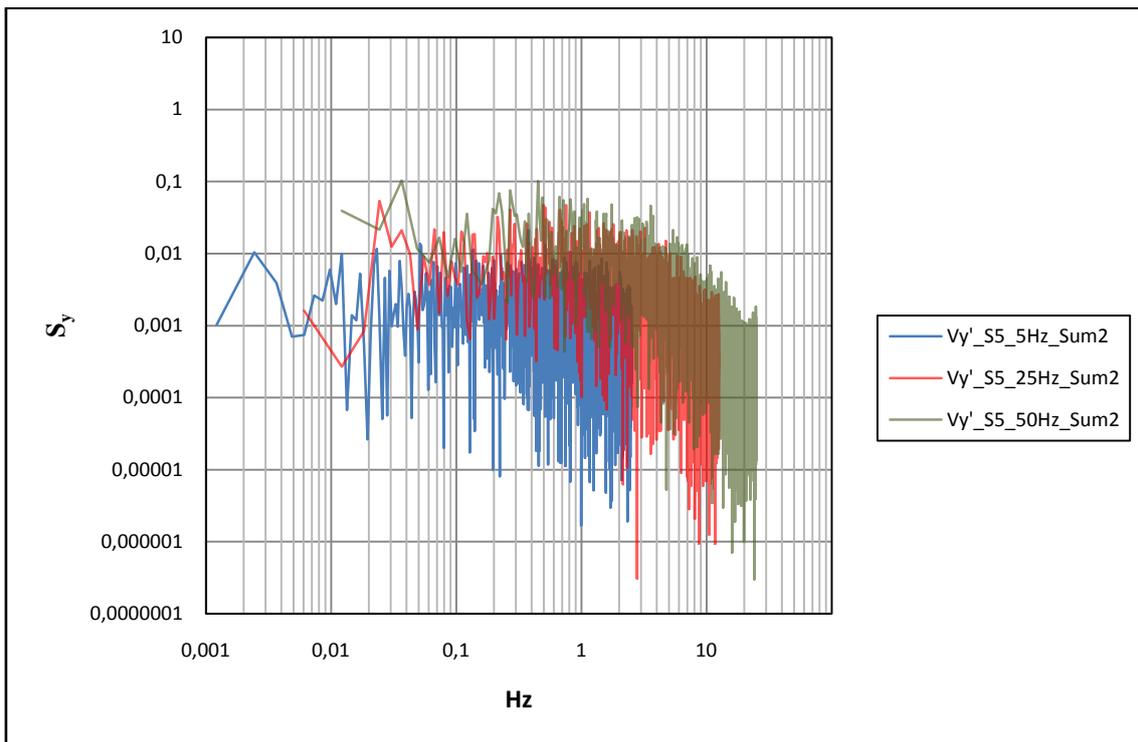


Figura 6.29. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

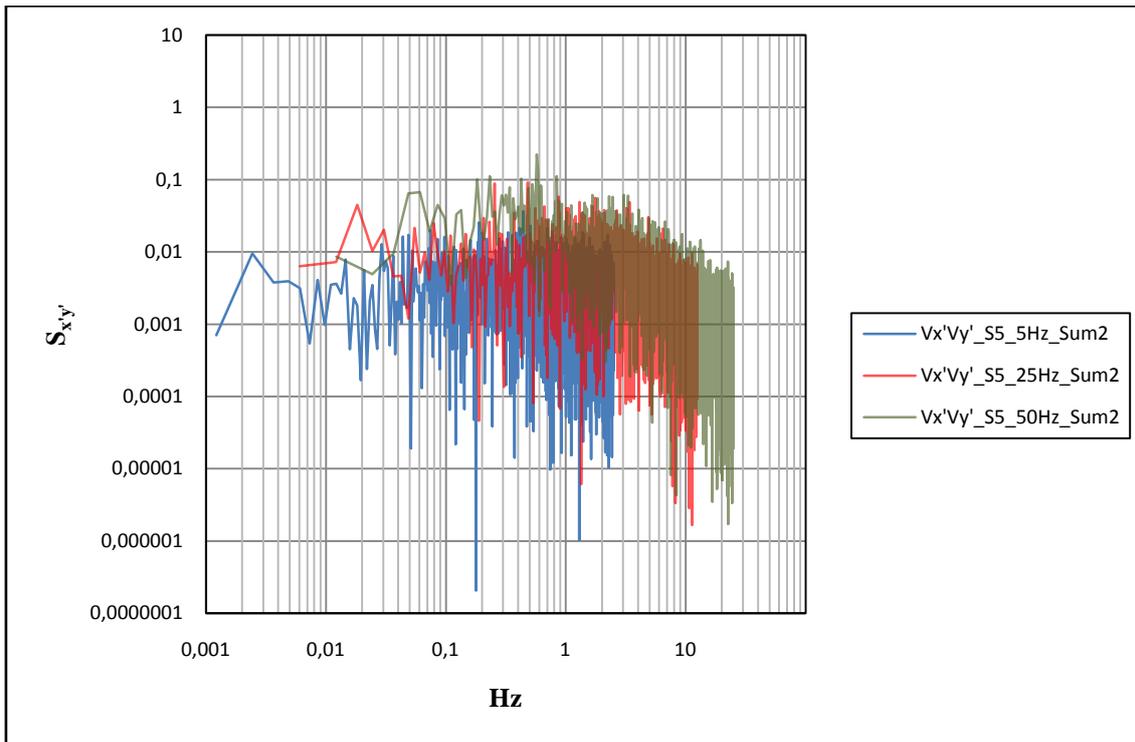


Figura 6.30. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

Centrándonos más en las secciones por separado, y analizándolas para cada frecuencia, comprobamos que:

En la **sección 3**, cuando medimos tanto a 5Hz , como a 25Hz y a 50Hz , el resalto libre posee más energía que el sumergido. También se observa que tanto el espectro del libre como el del sumergido empiezan siguiendo una pendiente casi horizontal, coincidiendo con la zona de más bajas frecuencias, siendo la mayor parte de la señal ruido blanco, siguiendo así lo dicho por Kolmogoroff (1941). Esto ocurre tanto en las velocidades fluctuantes como en la cortante.

A una **frecuencia de muestreo de 5Hz** , la ley de Kolmogoroff (1941) no se sigue de manera aceptable para ningún caso.

En la V_x' , a partir de $0,01\text{Hz}$ se empieza a hacer notar el ruido cada vez con mayor intensidad. A partir de una frecuencia de $0,06\text{Hz}$ ambos espectros (el del libre y el del sumergido) comienzan a coger una pendiente cada vez más inclinada, aunque bastante más pequeña que la estipulada por la ley de Kolmogoroff (1941) de $-5/3$, lo cual indica que hay mucho ruido en esta señal, llegando incluso a superponerse en gran medida a la señal turbulenta y haciendo que ésta se confunda con el ruido.

En la V_y' observamos que los espectros del resalto sumergido y del libre siguen una horizontal hasta una frecuencia de $0.03Hz$, a partir de la cual la forma del espectro comienza a ser algo distinta a la teórica, teniendo una forma de triángulo en la que un lado tiene una pendiente bastante menor que $-5/3$ y otra parte llega a tener pendiente positiva, generada por la gran cantidad de ruido que posee esta señal. En este caso podemos decir que para la frecuencia de muestreo de $5Hz$, la V_y' dentro de un resalto no sigue la ley de Kolmogoroff (1941) ya que el ruido es tan grande que se ha superpuesto a la señal turbulenta en gran cuantía, generando una señal compuesta por mucho más ruido que señal de turbulencia.

En la $V_x'V_y'$, se observa que la forma de los espectros del resalto libre y del sumergido tienen una forma muy parecida a los espectros de la V_y' en la sección 3 a $5Hz$, pero con menos ruido y, a diferencia que en la V_y' , siguen una horizontal hasta una frecuencia de $0.06Hz$. Podemos decir, al igual que para la V_y' que para la frecuencia de muestreo de $5Hz$, la $V_x'V_y'$ dentro del resalto no sigue la ley de Kolmogoroff (1941).

Con una **frecuencia de muestreo de $25Hz$** observamos que, por lo general, se sigue mejor la ley de Kolmogoroff (1941) que para $5Hz$, lo cual indica que las señales contienen menos ruido.

En la V_x' , con esta frecuencia de muestreo se tiene una zona de bajas frecuencias casi horizontal hasta un valor de $0.3Hz$, comenzando a descender rápidamente a partir de dicha frecuencia hasta coger una pendiente muy cercana a $-5/3$, ajustándose mejor a la ley de Kolmogoroff (1941), y también a simple vista se observa que contiene menos ruido que a $5Hz$.

En la V_y' observamos que ocurre algo parecido a lo visto con una frecuencia de $5Hz$, pero no tan exagerado. En este caso ambos espectros siguen una horizontal hasta una frecuencia de $0.2Hz$, aunque con bastante ruido. A partir de $0.2Hz$, el espectro del sumergido comienza a coger pendiente, aunque bastante menor a $-5/3$, y muy plagado de ruido. En el libre tarda más en coger la misma pendiente que el sumergido, pero a partir de $2Hz$ ambos tienen la misma pendiente, siempre muy menor a la teórica de Kolmogoroff (1941). Se observa en ambos que hay gran cantidad de ruido que está entorpeciendo la recepción correcta de

nuestra señal, por eso no se sigue la ley de Kolmogoroff (1941), aunque en este caso contiene menos ruido que para 5Hz.

En la $V_x'V_y'$ ocurre, al igual que sucedía con el muestreo a 5Hz, que la forma de los espectros del resalto libre y del sumergido son muy parecidos a los espectros de la V_y' . En este caso se observa que ambos espectros siguen una horizontal hasta una frecuencia de $0.3Hz$, aunque con bastante ruido. A partir de $0.3Hz$, ambos espectros comienzan a coger pendiente, aunque bastante menor a $-5/3$, y con bastante ruido. En ambos hay gran cantidad de ruido que está afectando mucho a la cortante de nuestra señal, por eso no se sigue la ley de Kolmogoroff (1941), aunque en este caso contiene menos ruido que para 5Hz.

Con una **frecuencia de muestreo de 50Hz** tanto las fluctuantes como la cortante siguen mejor la ley de Kolmogoroff (1941) que para frecuencias inferiores, notándose más la diferencia para la V_y' y para la $V_x'V_y'$, ya que la V_x' ha mejorado poco con respecto a la anterior frecuencia de muestreo.

En la V_x' pasa como para 25Hz, aunque en este caso parece que para la zona de bajas frecuencias tenemos más ruido que a 25Hz, pero a partir de $0.3Hz$ los espectros de ambos resaltos cogen rápidamente una pendiente pronunciada, siendo en el caso del sumergido igual a $-5/3$ a partir de una frecuencia de 1Hz, y la del libre algo menor a $-5/3$. Esto quiere decir que la señal turbulenta es mayor que la del ruido y no se le superpone éste en gran medida, conteniendo aún bastante ruido, pero no tan afectada como para 5Hz.

En la V_y' ya no pasa lo mismo que para 25Hz, ya que en este caso hasta una frecuencia de $1Hz$ si ocurre lo mismo, que siguen una horizontal con bastante ruido, pero a partir de dicha frecuencia ambos espectros comienzan a coger una pendiente que llega a ser muy parecida a la teórica de $-5/3$, aunque sensiblemente menor, pero ajustándose mucho mejor a la ley de Kolmogoroff (1941). También poseen mucho ruido, pero en bastante menos cantidad que a frecuencias menores. En este caso se puede decir que el ruido no se ha superpuesto en tan grandes cantidades a la señal de la turbulencia a una frecuencia de muestreo de 50Hz como sucedía en frecuencias menores.

En la $V_x'V_y'$, tenemos un espectro con mejores características que con frecuencias inferiores, ya que contiene menos ruido y la pendiente adoptada se acerca más a la teórica. En este caso ambos espectros siguen una horizontal

hasta unos 0.5Hz , donde empiezan a tomar pendiente hasta acercarse a la teórica del rango de inercia, de $-5/3$, aunque no llegan a ser así por culpa del ruido, que afecta al cortante en este caso de manera menos notoria que en las frecuencias anteriores, pero si en bastante cuantía.

En las siguientes figuras 6.31, 6.32 y 6.33 se muestran ejemplos de los espectros de energía de las velocidades fluctuantes V_x' y V_y' y de la cortante $V_x'V_y'$ en las secciones 3 de los resaltes libres y del sumergidos elegidos.

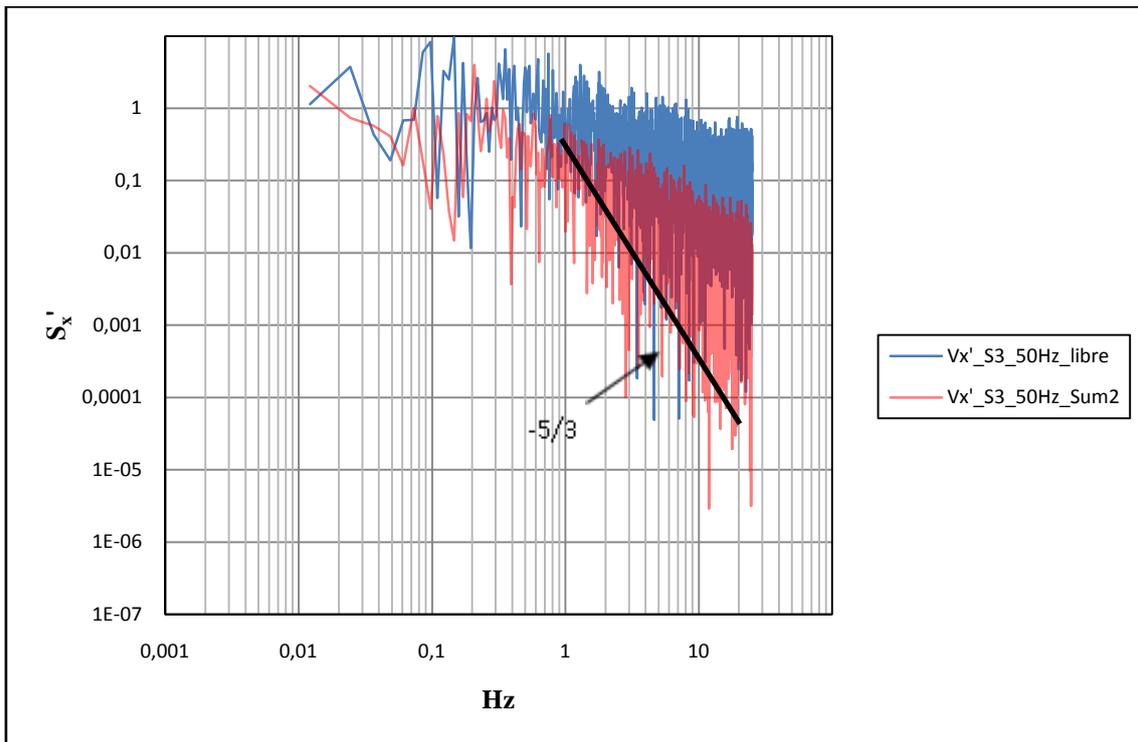


Figura 6.31. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

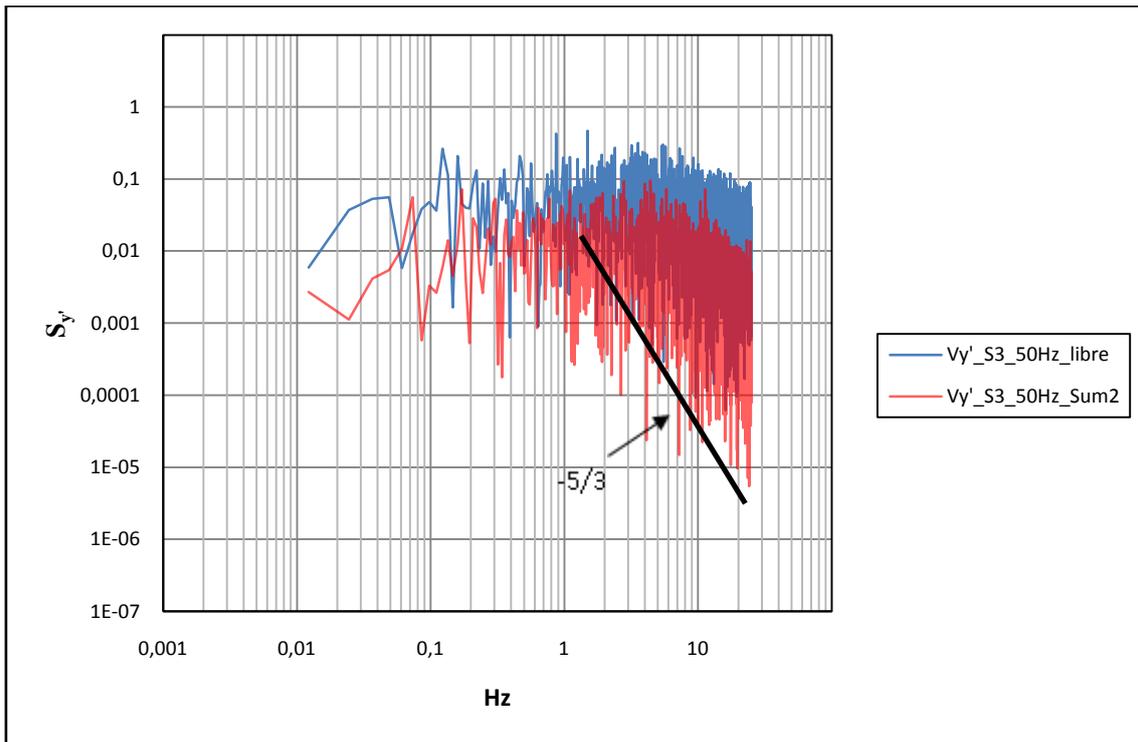


Figura 6.32. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

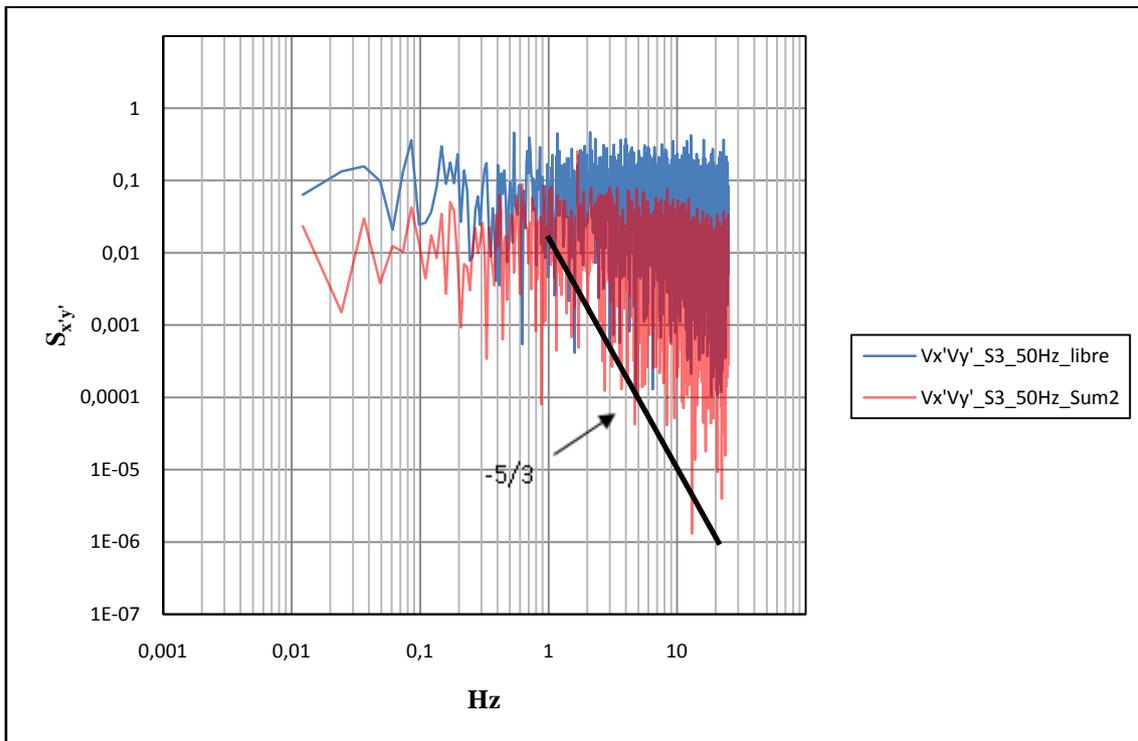


Figura 6.33. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

En la **sección 5** ocurre, al contrario que en la sección 3, que el resalto sumergido posee algo más de energía que el libre, pero en todo lo demás es muy similar a la sección 3. Esto ocurre tanto para las fluctuantes como para la cortante.

A una **frecuencia de muestreo de 5Hz** observamos que los espectros de la V_y' y de la $V_x'V_y'$ no siguen la ley de Kolmogoroff (1941) tanto en libre como en sumergido, y que la V_x' la sigue en el caso del sumergido mejor que en el libre.

En la V_x' , tanto en el resalto libre como en el sumergido, sus espectros siguen una horizontal hasta $0.1Hz$, comenzando a inclinarse a partir de esta frecuencia. En el caso del sumergido vemos que rápidamente coge una pendiente de $-5/3$, siendo en el libre la pendiente menor. Esto significa que en el sumergido el ruido no ha afectado tanto a la señal como en el libre, siguiendo el primero la ley de Kolmogoroff (1941) de manera bastante aceptable. Deducimos de esto que en el libre el ruido se ha superpuesto en gran medida a la señal y en el sumergido no.

En la V_y' , tanto en libre como en sumergido, sus espectros siguen una horizontal hasta $0.1Hz$, conteniendo gran cantidad de ruido. A partir de $0.1Hz$ comienzan a ganar pendiente, pero los espectros contienen gran cantidad de ruido que les impide llegar a tener una pendiente cercana a la teórica de $-5/3$. En este caso se puede decir que no cumplen la ley de Kolmogoroff (1941) debido a la presencia del ruido, aunque contienen menos ruido que los de la sección 3.

En la $V_x'V_y'$ ocurre como en la V_y' , tanto en libre como en sumergido sus espectros siguen una horizontal hasta $0.06Hz$, conteniendo gran cantidad de ruido. A partir de $0.06Hz$ cogen una pendiente menor a la teórica, por lo cual no cumplen la ley de Kolmogoroff (1941) debido a la gran cantidad de ruido. Pero se puede ver que los espectros contienen algo menos de ruido que los de la sección 3.

A una **frecuencia de muestreo de 25Hz** la V_x' sigue de manera bastante aceptable la ley de Kolmogoroff (1941), y la V_y' y la $V_x'V_y'$ la siguen, pero en menor medida que la V_x' .

En la V_x' ambos espectros contienen menos ruido que a 5Hz. En este caso se observa que hasta una frecuencia de $0.5Hz$ los espectros siguen una horizontal, y que a partir de dicha frecuencia cogen rápidamente una pendiente de $-5/3$ mezclándose los gráficos de ambos espectros a partir de $1Hz$. Como vemos, ambos cumplen la ley de Kolmogoroff (1941) de una manera bastante aceptable,

y, aunque contengan bastante ruido, como todas las mediciones, dicho ruido no ha afectado de manera considerable a la señal recibida.

En la V_y' , al igual que en la V_x' , ambos espectros contienen menos ruido que a 5Hz. En este caso se observa que hasta una frecuencia de 0.5Hz los espectros siguen una horizontal, con bastante ruido, pero menos que a 5Hz, y que a partir de dicha frecuencia comienzan a coger pendiente llegando a acercarse a la de $-5/3$ a partir de 1Hz . Como ocurría en el caso de la V_x' , los gráficos de ambos espectros se mezclan a partir de 1Hz . Se deduce en este caso que, al contrario de lo ocurrido a 5Hz, a 25Hz se cumple la ley de Kolmogoroff (1941) en cierta medida ya que el ruido presente no es tan grande como para superponerse a la señal de la turbulencia.

En la $V_x'V_y'$ ambos espectros contienen menos ruido que a 5Hz. En este caso se observa que hasta una frecuencia de 0.4Hz los espectros siguen una horizontal, con bastante ruido, y que a partir de dicha frecuencia comienzan a ganar pendiente, quedándose algo por debajo de la teórica de $-5/3$. Como ocurría en el caso de las fluctuantes normales, los gráficos de ambos espectros se mezclan a partir de 1Hz . En este caso el espectro de energía de ambos espectros sigue de una manera más aceptable la ley de Kolmogoroff (1941).

Con una **frecuencia de muestreo de 50Hz** todos los espectros, tanto de los resaltos sumergidos como de los libres, y tanto en las velocidades fluctuantes como en la cortante se sigue la ley de Kolmogoroff (1941) de una manera aceptable, siendo mejor en la V_x' y peor en la V_y' , pero siempre aceptable.

En la V_x' observamos que en el caso del sumergido el espectro sigue una horizontal hasta una frecuencia de 0.2Hz , cogiendo pendiente hasta llegar a 1Hz , donde la pendiente se hace de $-5/3$ siguiendo así la ley de Kolmogoroff (1941). También se observa que cuando pasa de los 10Hz comienza a perder pendiente y a tener más ruido. En el libre, el espectro sigue una horizontal hasta una frecuencia de 0.6Hz , comenzando a ganar pendiente a partir de dicha frecuencia, hasta llegar a 1Hz , donde el gráfico del libre se mezcla con el del sumergido y cogen la misma forma. Con esta frecuencia de muestreo el ruido es menor que con las anteriores y se puede ver a simple vista observando el espectro, y se comprueba al ver que las pendientes se ajustan mejor a lo estipulado en la ley de Kolmogoroff (1941).

En la V_y' , en el caso del sumergido el espectro sigue una horizontal hasta una frecuencia de $0.4Hz$, cogiendo pendiente hasta llegar a $1Hz$, donde la pendiente se hace de $-5/3$ siguiendo así la ley de Kolmogoroff (1941). En el libre, el espectro sigue una horizontal hasta una frecuencia de $0.6Hz$, comenzando a ganar pendiente a partir de dicha frecuencia, hasta llegar a $1Hz$, donde su gráfico se mezcla con el del sumergido y cogen la misma forma. Con esta frecuencia de muestreo el ruido es menor que con las anteriores. Por lo cual en este caso la V_y' medida a $50Hz$ cumple la teoría de Kolmogoroff (1941) ya que el ruido no se ha superpuesto a la señal.

En la $V_x'V_y'$, en el caso del sumergido el espectro sigue una horizontal hasta una frecuencia de $0.4Hz$, cogiendo pendiente hasta llegar a $3Hz$, donde la pendiente se hace de $-5/3$ siguiendo así la ley de Kolmogoroff (1941). En el libre, el espectro sigue una horizontal hasta una frecuencia de $1Hz$, comenzando a ganar pendiente a partir de dicha frecuencia, hasta llegar a $4Hz$, donde se mezclan los gráficos del libre y del sumergido y cogen la misma forma. Con esta frecuencia de muestreo, el ruido es menor que con las anteriores. Por lo cual en este caso la medida a $50Hz$ de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ cumple la teoría de Kolmogoroff (1941).

En las siguientes figuras 6.34, 6.35 y 6.36 se muestran ejemplos de los espectros de energía de las velocidades fluctuantes V_x' y V_y' y de la cortante $V_x'V_y'$ en las secciones 5 del resalto libre y del sumergido elegidos.

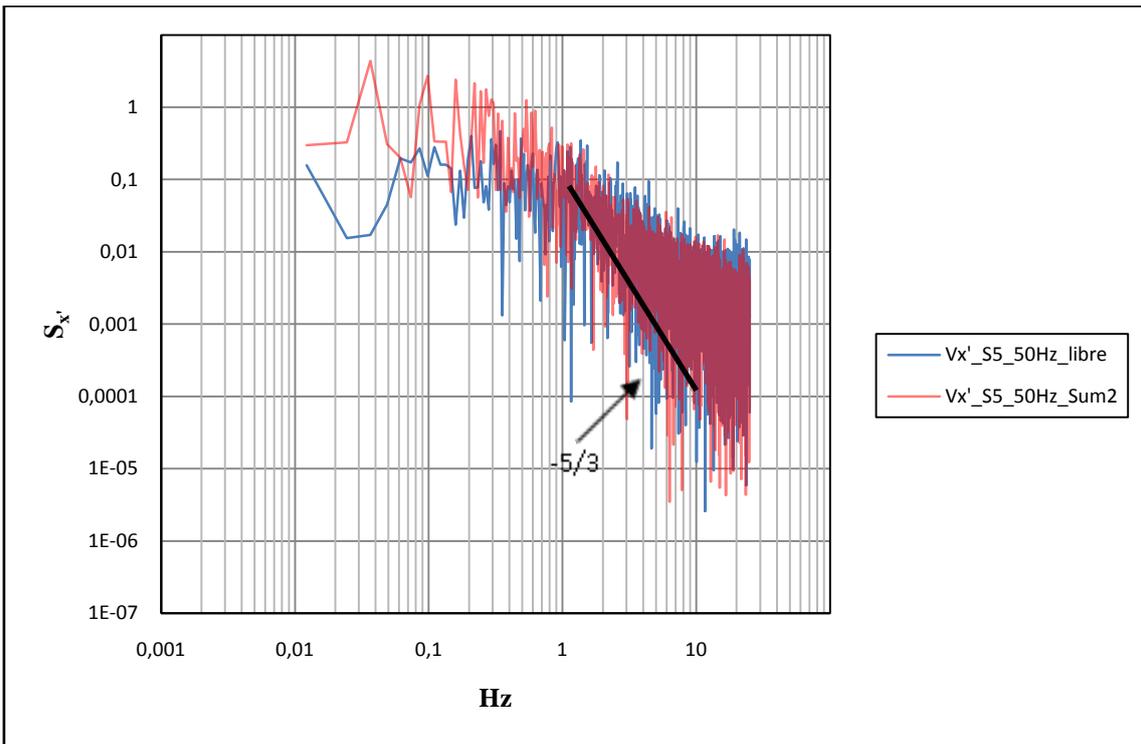


Figura 6.34. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

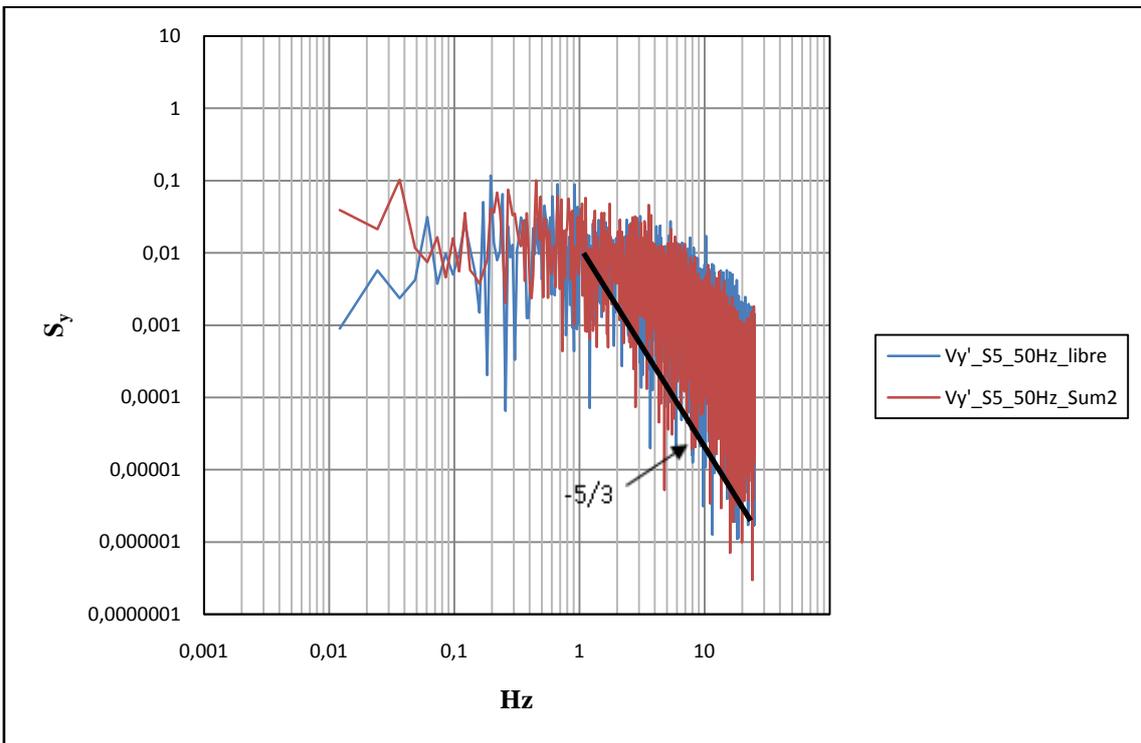


Figura 6.35. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

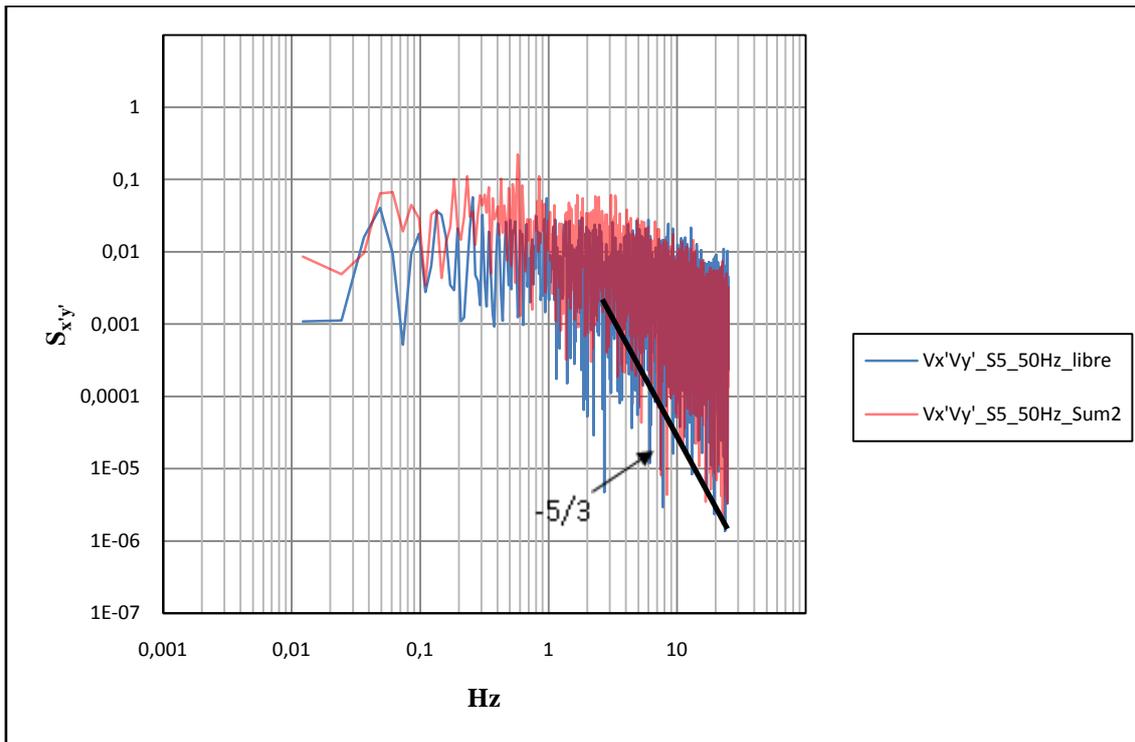


Figura 6.36. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_x'V_y'$ en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

Se ha observado que en la totalidad de las mediciones, tanto de las velocidades fluctuantes como de la cortante, hay una diferencia entre las tomadas en la sección 5 con las de la sección 3, ya que en la sección 5 siguen la ley de Kolmogoroff (1941) de una manera bastante más aceptable que en la sección 3. También a simple vista se observa que en los espectros de la sección 5 hay menos ruido que en los espectros de la sección 3. Esto se explica por la sencilla razón de que la sección 3 está dentro del resalto, en una zona muchísimo más turbulenta y agitada que la sección 5, por lo cual el ruido presente en la sección 3 será mayor que el presente en la sección 5.

Esto lo podemos comprobar mejor observando las siguientes figuras, donde se comparan espectros medidos a mismas frecuencias, pero en distinta posición longitudinal del mismo resalto.

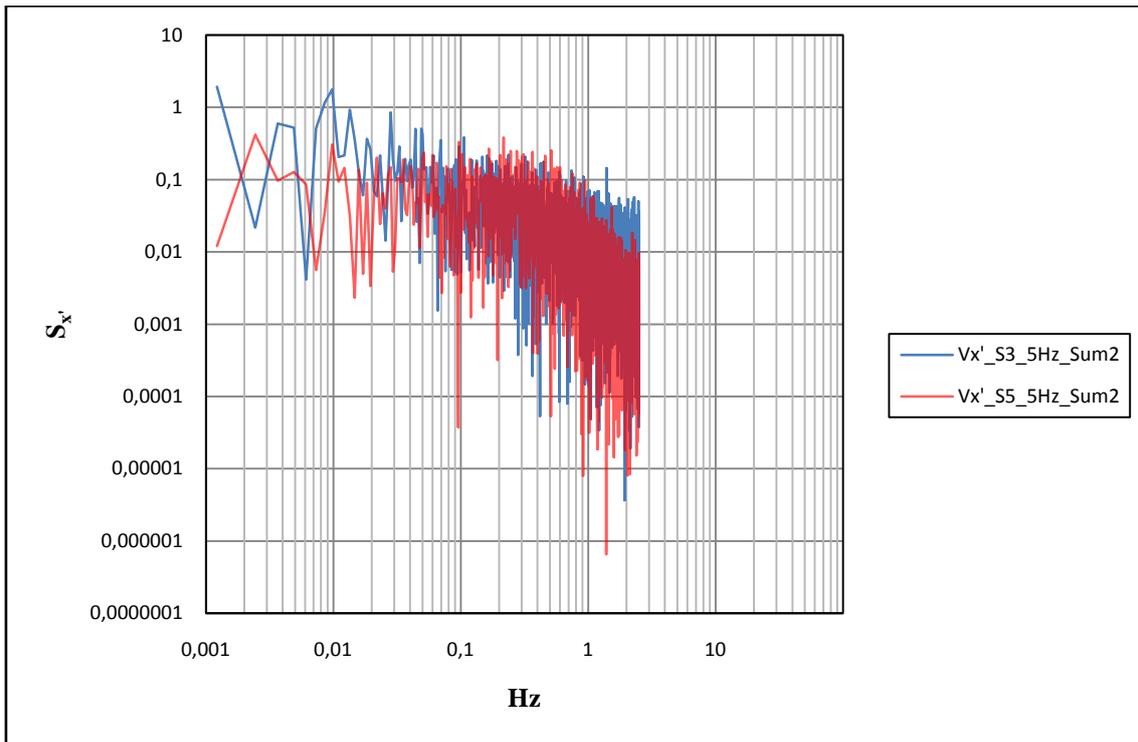


Figura 6.37. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V'_x en la sección 3 y en la sección 5 del resalto sumergido a 5Hz.

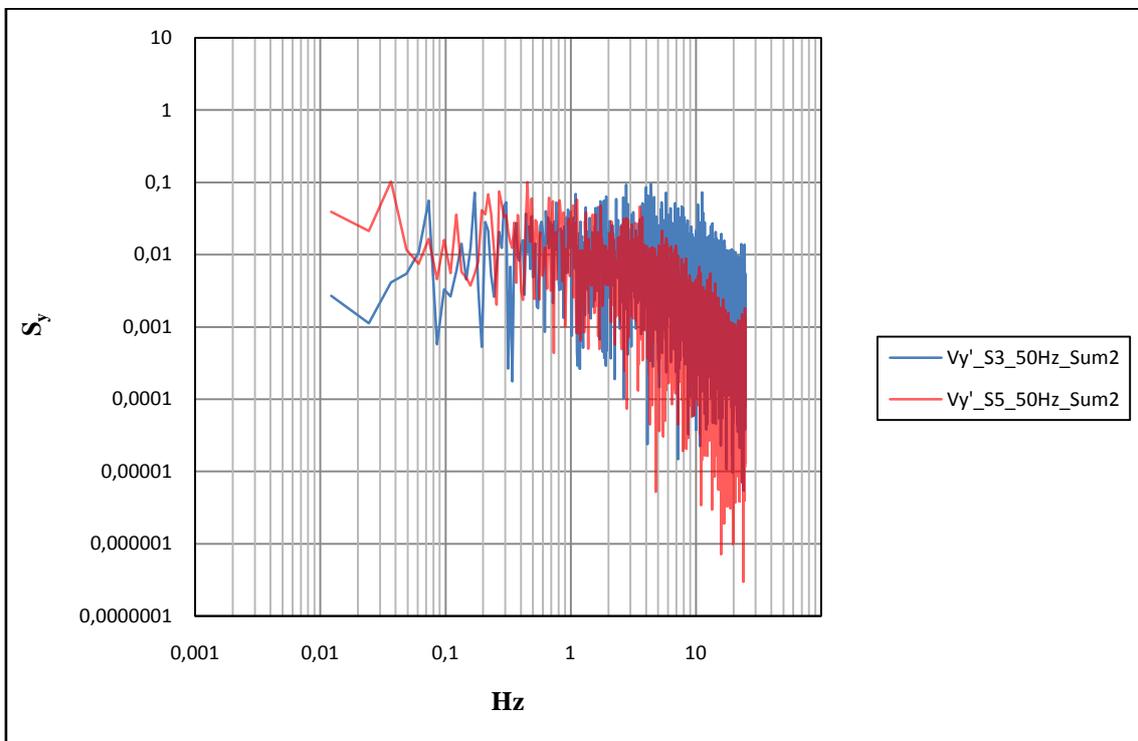


Figura 6.38. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V'_y en la sección 3 y en la sección 5 del resalto sumergido a 50Hz.

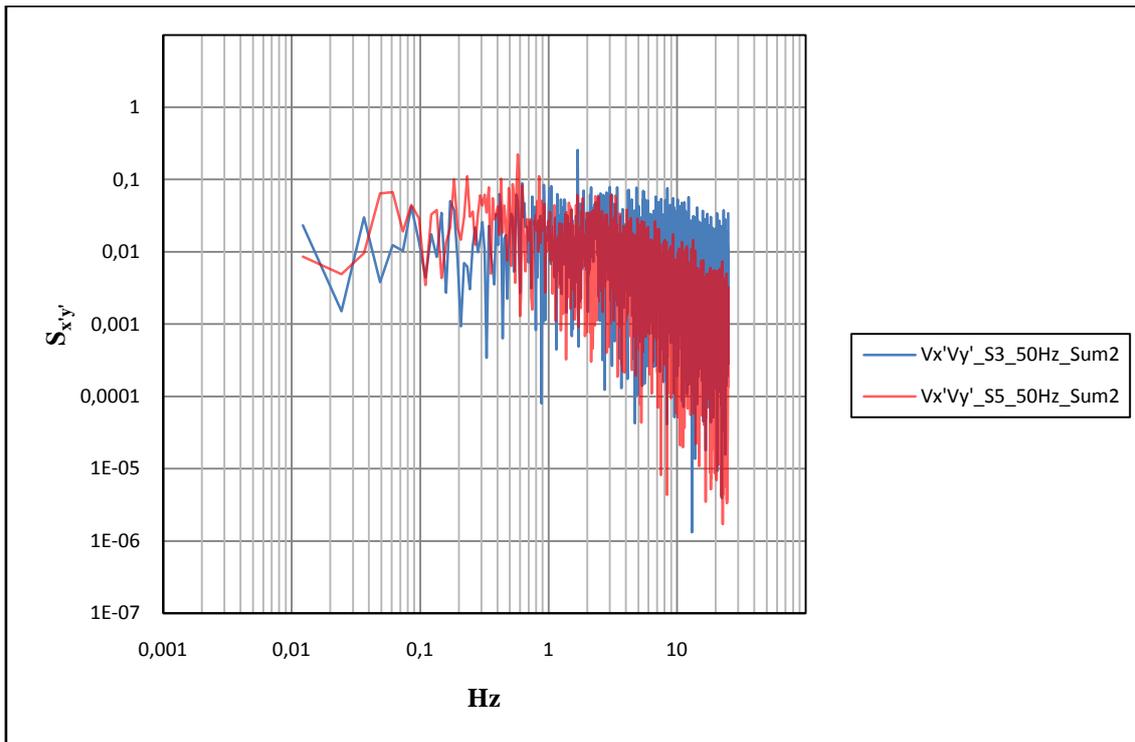


Figura 6.39. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 3 y en la sección 5 del resalto sumergido a 50Hz.

6.7.3.2.2. Comparaciones y observaciones resultantes del análisis de las distintas componentes.

Se ha observado que tanto las componentes fluctuantes como la cortante siguen unas mismas tendencias de ruido captado y forma del espectro con respecto a la frecuencia de muestreo.

Así, tenemos que para la frecuencia de muestreo de 5Hz los espectros no suelen seguir la ley de Kolmogoroff (1941) debido a que poseen gran cantidad de ruido.

En la frecuencia de muestreo de 25Hz los espectros tienen ya una forma mejor definida y con menos ruido y se acercan bastante a la ley teórica de Kolmogoroff (1941), viéndose aún bastante influenciadas por el ruido.

En la frecuencia de muestreo de 50Hz ya se ve claramente la forma de los espectros, que en este caso se ajustan bastante a la ley de Kolmogoroff (1941) al seguir una pendiente mejor definida de $-5/3$ en el subrango de inercia del espectro. También hay que mencionar que estas mediciones no se encuentran, ni mucho menos, libres de ruido, pero sí que se ven mucho menos afectadas por él.

Los subrangos que caracterizan a un espectro de energía de un flujo turbulento según Kolmogoroff (1941), en nuestras observaciones se corresponden con las siguientes frecuencias:

❖ Frecuencia de Muestreo de 5Hz:

Sección 3:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se encuentra en las frecuencias $f < 0.6\text{Hz}$. Este subrango se caracteriza por la presencia de ruido blanco que hace que el espectro siga una pendiente prácticamente horizontal en las bajas frecuencias.
- El subrango de inercia se encuentra en frecuencias $f > 0.6\text{Hz}$. Este subrango se caracteriza por la pendiente de $-5/3$ que debe tener una señal libre de ruido

Sección 5:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se encuentra en las frecuencias $f < 0.1\text{Hz}$.
- El subrango de inercia se encuentra en frecuencias $f > 0.1\text{Hz}$.

❖ Frecuencia de muestreo de 25Hz:

Sección 3:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se encuentra en las frecuencias $f < 0.3\text{Hz}$.
- El subrango de inercia se encuentra en las frecuencias $f > 0.3\text{Hz}$.

Sección 5:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se encuentra en las frecuencias $f < 0.5\text{Hz}$.
- El subrango de inercia se encuentra en las frecuencias $f > 0.5\text{Hz}$.

❖ Frecuencia de muestreo de 50Hz:

Sección 3:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se encuentra en las frecuencias $f < 0.5\text{Hz}$.
- El subrango de inercia se encuentra en las frecuencias $f > 0.5\text{Hz}$.

Sección 5:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se encuentra en las frecuencias $f < 0.4\text{Hz}$.
- El subrango de inercia se encuentra en las frecuencias $f > 0.4\text{Hz}$.

En ningún caso hemos llegado a ver el subrango viscoso de altas frecuencias, ya que con los aparatos que tenemos no podemos medir a más de 50Hz y no hemos podido ver las zonas de altas frecuencias que se caracterizan por tener pendientes del orden de $-7/3$.

Los otros dos subrangos que si tenemos presentes se caracterizan por lo siguiente:

- El subrango de producción de bajas frecuencias se caracteriza por la presencia de ruido blanco que hace que el espectro siga una pendiente prácticamente horizontal en las bajas frecuencias.
- El subrango de inercia se caracteriza por la pendiente de $-5/3$ que tienen un espectro al pasar por dicho subrango.

En nuestras observaciones vemos claramente esos subrangos en casi todas ellas aunque las señales contengan mucho ruido.

En la siguiente figura se han señalado los dos subrangos que aparecen en nuestros espectros de energía.

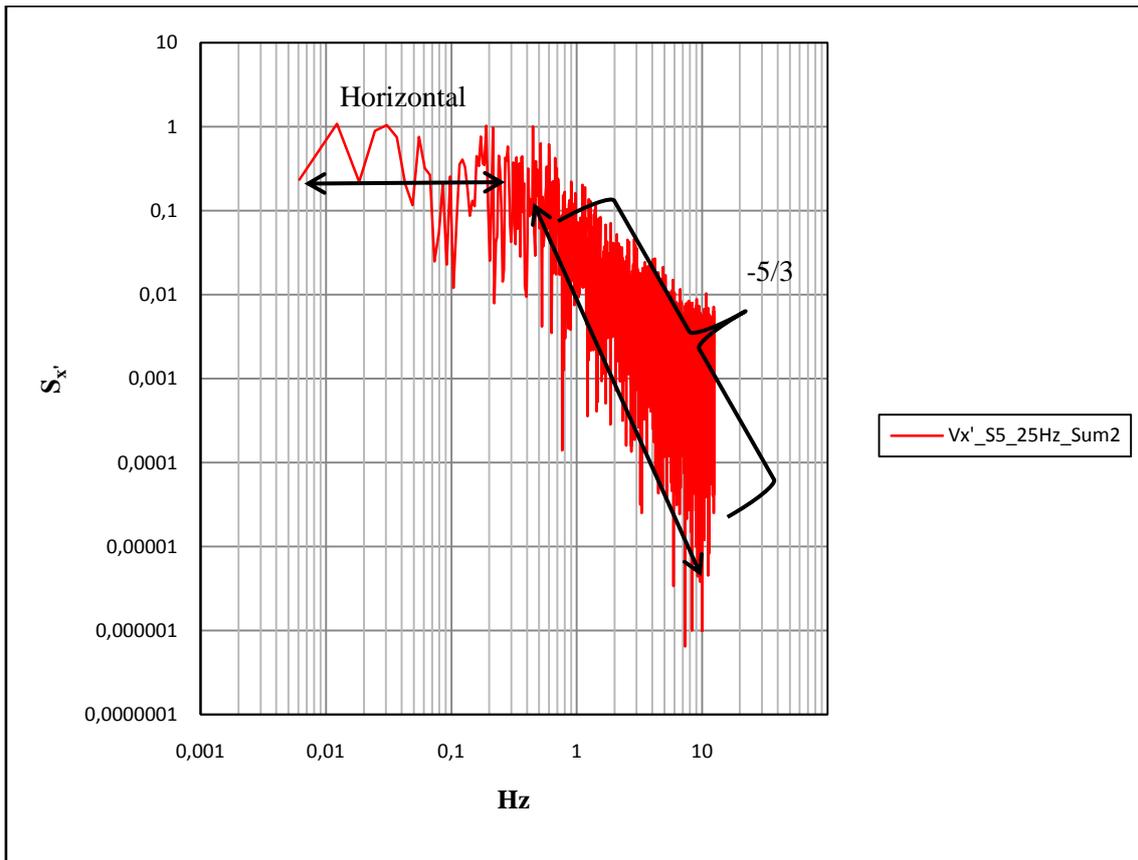


Figura 6.45. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto sumergido a 25Hz.

En cuanto a las comparaciones de las distintas frecuencias de muestreo en función de sus parámetros estadísticos, se adjunta la siguiente tabla con las desviaciones estándar (RMS) de V_x' , V_y' y $V_x'V_y'$ y las medias de las velocidades V_x y V_y de la serie de velocidades.

Hz	Sección	\bar{V}_x	\bar{V}_y	RMS [V_x']	RMS [$V_x'V_y'$]	RMS [V_y']
5	S3 Libre	52,83	4,45	15,23	6,32	4,16
	S3 Sum2	52,96	0,92	7,40	2,79	1,69
	S5 Libre	30,50	0,47	3,58	1,75	1,42
	S5 Sum2	23,10	0,82	6,18	2,58	1,74
25	S3 Libre	54,08	4,39	20,72	9,74	7,35
	S3 Sum2	51,09	0,79	8,75	4,21	3,35
	S5 Libre	30,94	0,42	4,58	2,45	2,16
	S5 Sum2	23,18	0,89	6,41	3,02	2,31
50	S3 Libre	52,97	4,26	22,95	11,09	8,56
	S3 Sum2	49,75	0,71	9,18	4,65	3,78
	S5 Libre	31,51	0,50	5,03	2,72	2,42
	S5 Sum2	21,48	0,63	7,03	3,27	2,47

Tabla 11. Parámetros estadísticos de la turbulencia.

Comparando estos datos con los análisis de los espectros de energía podemos sacar en conclusión que cuanto más velocidad tiene el flujo, mayor ruido es captado por la sonda. Por eso, el ruido iba aumentando en las distintas secciones, siendo la sección 3 del resalto libre la más ruidosa y la sección 5 del resalto sumergido la que menos ruido tiene.

También se observa que la frecuencia de muestreo no altera las velocidades medias de manera notable, quedando estas velocidades con medias muy parecidas.

Sin embargo las desviaciones estándar (o raíz cuadrática media) si se ven muy alteradas con los cambios de frecuencias, teniendo mayores desviaciones con mayores frecuencias:

$$\text{RMS } [V_x'] \text{ a } 50\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'] \text{ a } 25\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'] \text{ a } 5\text{Hz}$$

$$\text{RMS } [V_y'] \text{ a } 50\text{Hz} > \text{RMS } [V_y'] \text{ a } 25\text{Hz} > \text{RMS } [V_y'] \text{ a } 5\text{Hz}$$

$$\text{RMS } [V_x'V_y'] \text{ a } 50\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'V_y'] \text{ a } 25\text{Hz} > \text{RMS } [V_x'V_y'] \text{ a } 5\text{Hz}.$$

Como se puede ver, comparando con los espectros obtenidos, se puede decir que a mayores desviaciones estándar hay menos ruido, pero es algo contradictorio, que puede ser explicado por el ruido mismo.

Sabemos que el ruido es aleatorio, por lo cual tenderá a tener una desviación estándar aleatoria.

La turbulencia no es aleatoria y su desviación estándar será mayor conforme aumente la turbulencia.

Por eso, conforme aumenta la frecuencia de muestreo, aumenta la señal de turbulencia captada por la sonda, por eso la desviación típica de las velocidades fluctuantes y de la cortante aumenta con la frecuencia de muestreo.

Se confirma así que cuanto mayor es la frecuencia de muestreo, menor proporción de ruido tendremos en nuestras mediciones.

7. CONCLUSIONES

Equipo.

En relación al canal utilizado, debido a la presencia de efectos de escala y otros problemas que puedan quedar ocultos, se muestra la necesidad de un canal nuevo y con mayor capacidad para el estudio sistemático de los fenómenos hidráulicos en lámina libre de interés para la ingeniería civil y la comunidad científica.

En cuanto al aliviadero utilizado, se ha observado que no se ajusta del todo bien al canal y por sus laterales pueden pasar flujos de agua, generando corrientes cruzadas que alteran el flujo principal que cae por el aliviadero.

Respecto a la metodología Doppler, poco utilizada para esta finalidad debido a sus limitaciones, no ha supuesto un problema sino que agudiza el ingenio para solventar los problemas, como el filtro digital que se ha inventado para el tratamiento de datos. No disponiendo presupuesto para una sonda Laser o para un equipo ADV con cuatro receptores, podemos ratificar que el equipo ADV con dos o tres receptores es una solución técnica y económica viable.

Campos de estudio.

- *Características de la longitud de resalto*

La longitud de resalto hidráulico libre se ha deducido mediante la ecuación de Silvester (6.3). La del resalto sumergido no hemos tomado la verdadera, sino que hemos tomado las mismas secciones ubicadas en el mismo sitio que las del resalto libre con mismo caudal para hacer las comparaciones pertinentes.

- *Relación entre calados inicial y final.*

La expresión teórica de Bélanger 6.8 ha sido utilizada para este estudio, ya que en años anteriores se demostró su validez para flujo no desarrollado en resaltos hidráulicos libres. Para los resaltos hidráulicos sumergidos se utilizó la expresión 6.11, ya demostrada por Márquez (2006).

- *Pérdidas de Energía*

Las pérdidas de energía en los resaltos hidráulicos sumergidos son superiores en nuestras experiencias a la ley teórica. Tuvimos que realizar el ajuste del calado conjugado y_3 al calado teórico y_{3t} en los resaltos hidráulicos sumergidos para ajustar las pérdidas de energía relativa a los valores teóricos.

- *Campos de velocidad en los resaltos hidráulicos.*

Referente a los perfiles de velocidad adimensionalizados, hemos realizado los ajustes para las velocidades negativas tanto para resalto libre como sumergido.

Respecto a la caída máxima de velocidad se aprecia una reducción del 40% en comparación con la ley de Ohtsu.

- *Descomposición frecuencial de la turbulencia.*

Tras haber analizado las turbulencias de series de velocidades muestreando a distintas frecuencias, hemos deducido que, como al aumentar la frecuencia de muestreo se captan mayor número de señales por segundo, se reduce el porcentaje de ruido que contiene la señal bruta captada con respecto a la turbulencia, mejorando así el espectro obtenido mediante el análisis de Fourier. También se ha visto que dentro del resalto hay más ruido que fuera del resalto, y también que los resaltos sumergidos contienen menos ruido que los libres.

ANEXO I

PERFILES DE VELOCIDAD PARA CADA RESALTO ANALIZADO

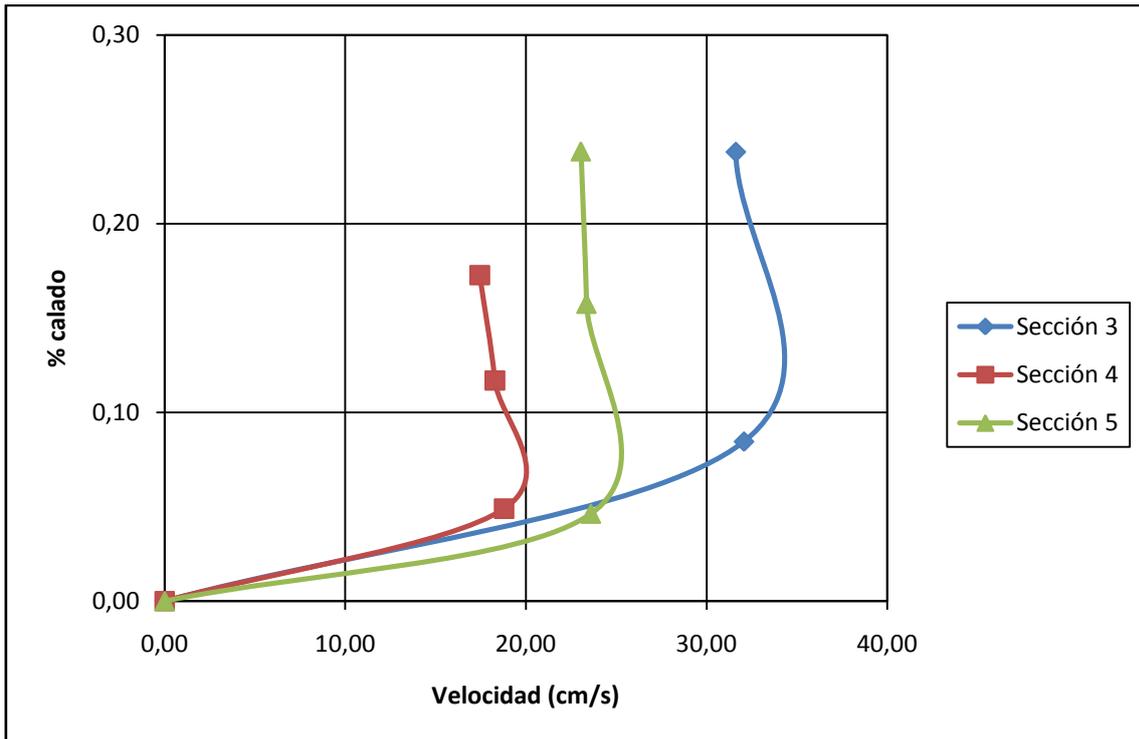


Figura A.I.1. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 4.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

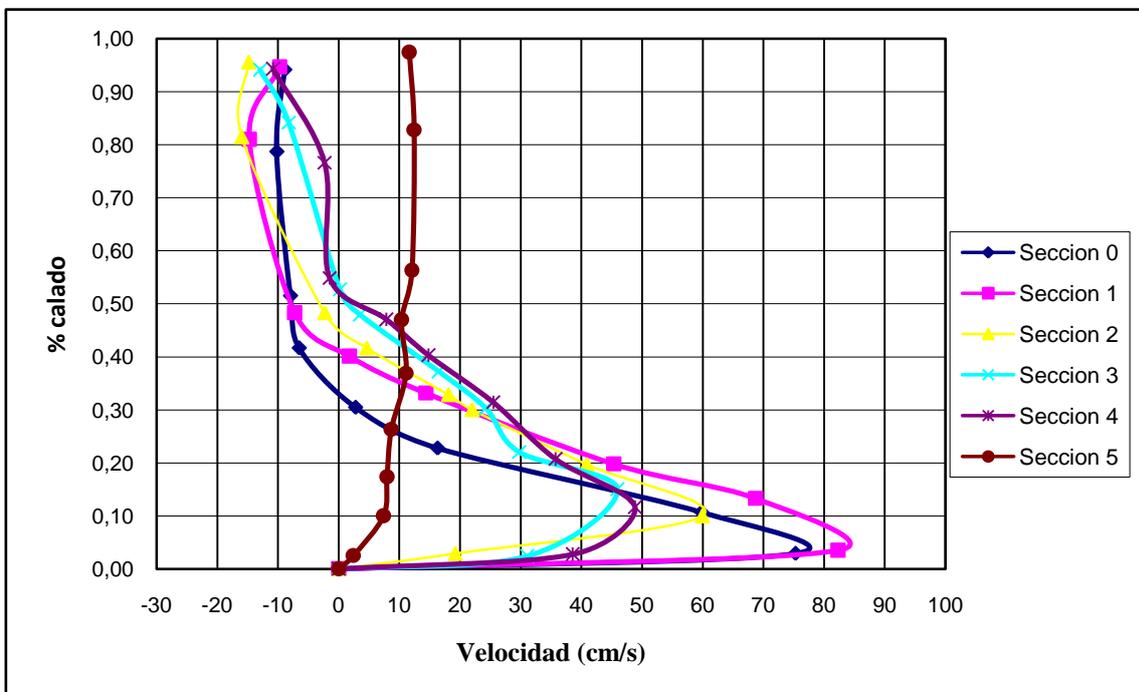


Figura A.I.2. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a 14.8cm y $Q=4.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

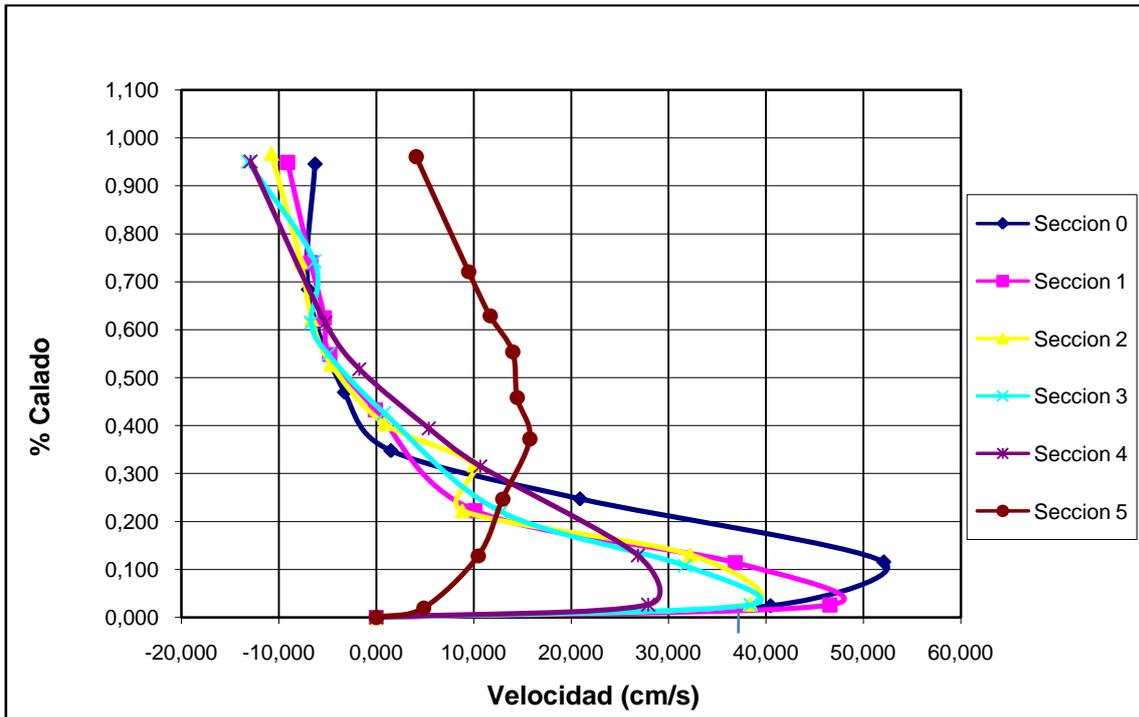


Figura A.I.3. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a $14.8 + H/2$ cm (16.2cm) y $Q=4.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

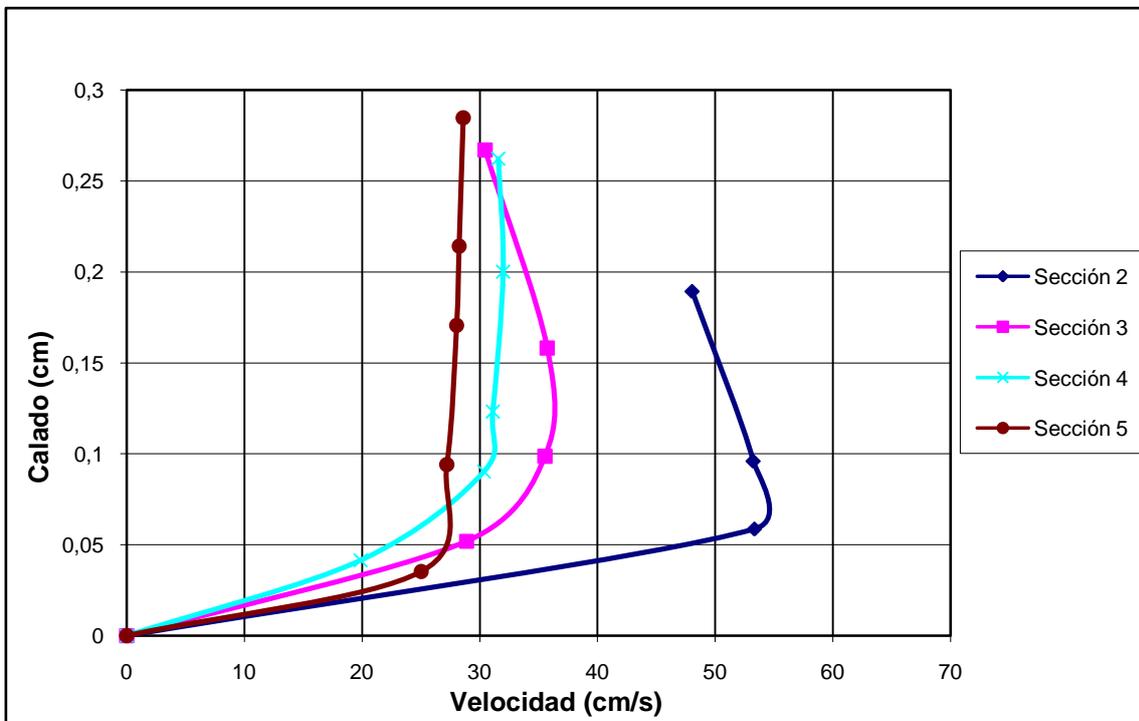


Figura A.I.4. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 5.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

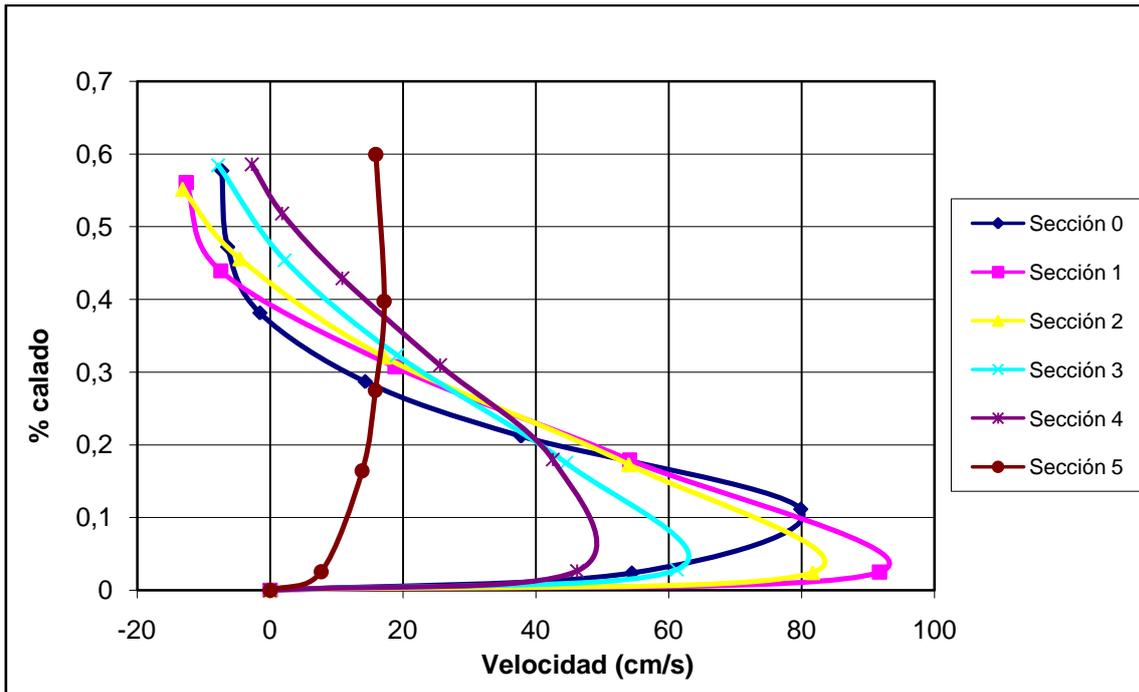


Figura A.I.5. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a 14.8cm y $Q=5.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

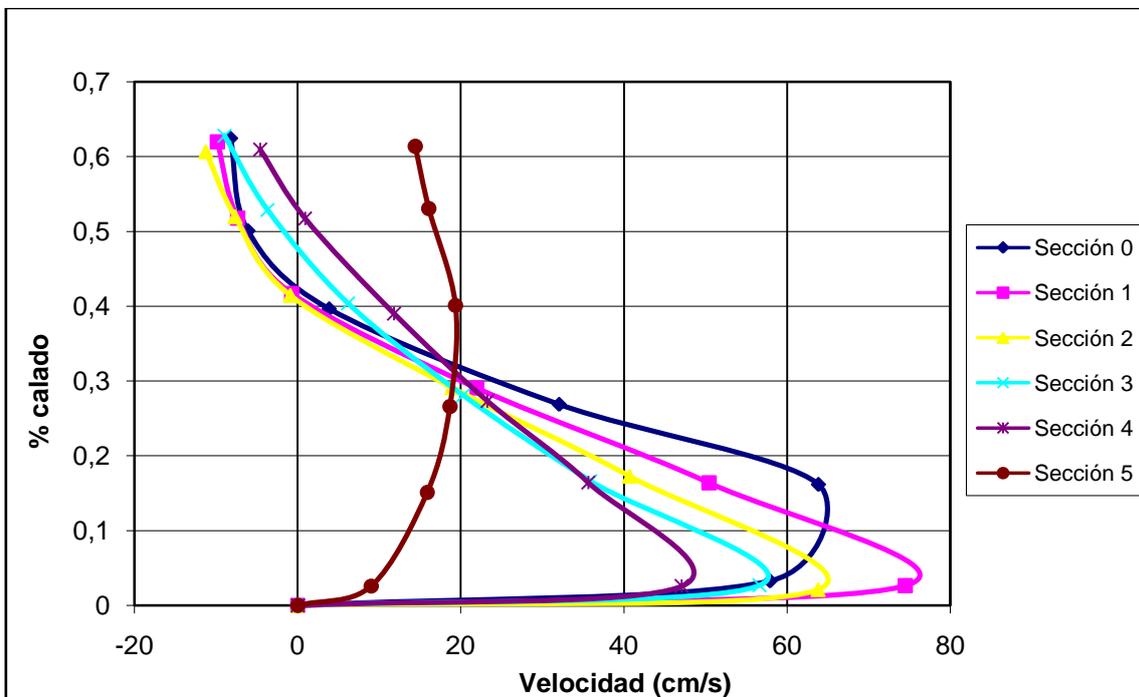


Figura A.I.6. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a $14.8 + H/2 \text{ cm}$ (16.2cm) y $Q=5.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

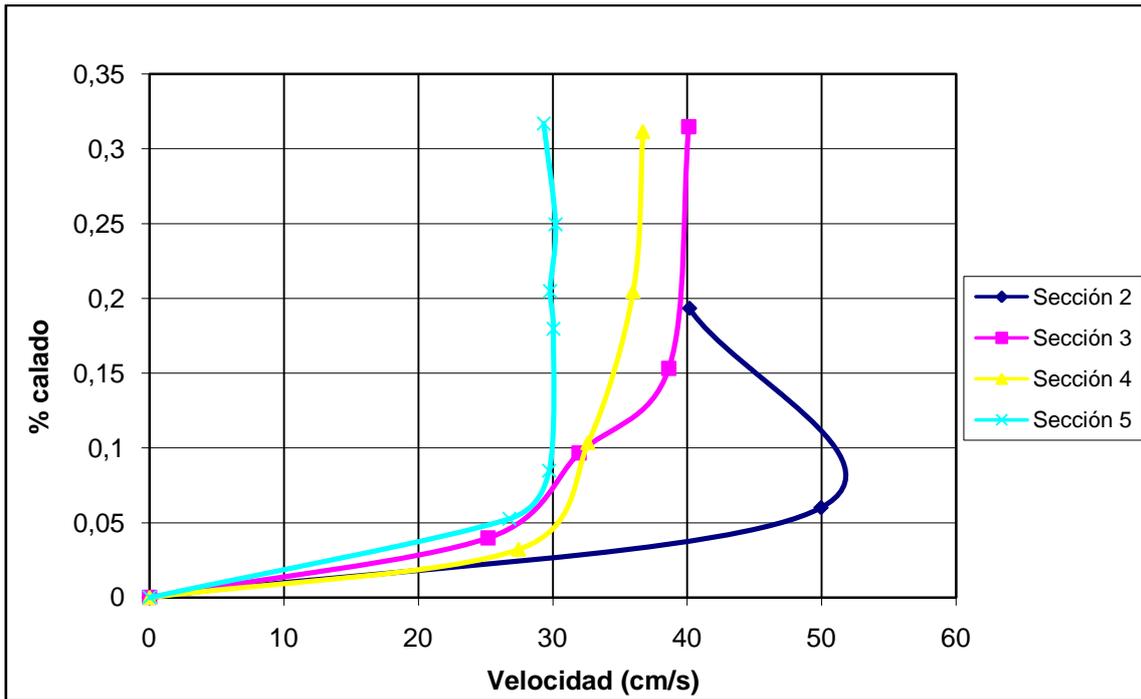


Figura A.I.7. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 6.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

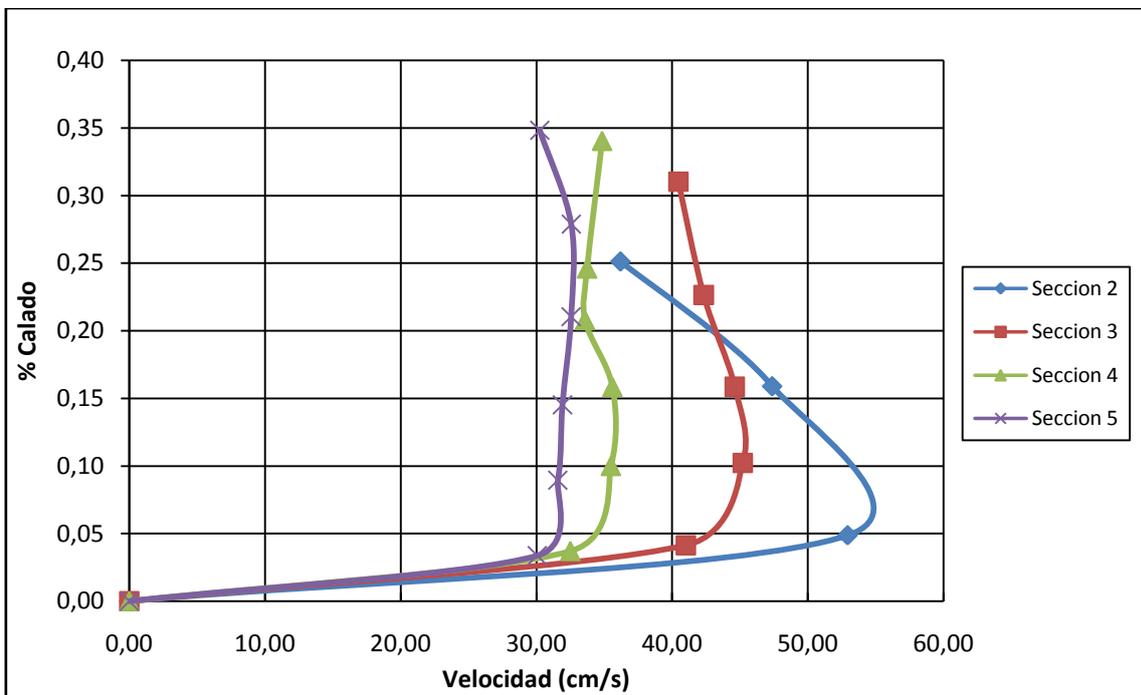


Figura A.I.8. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 7.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

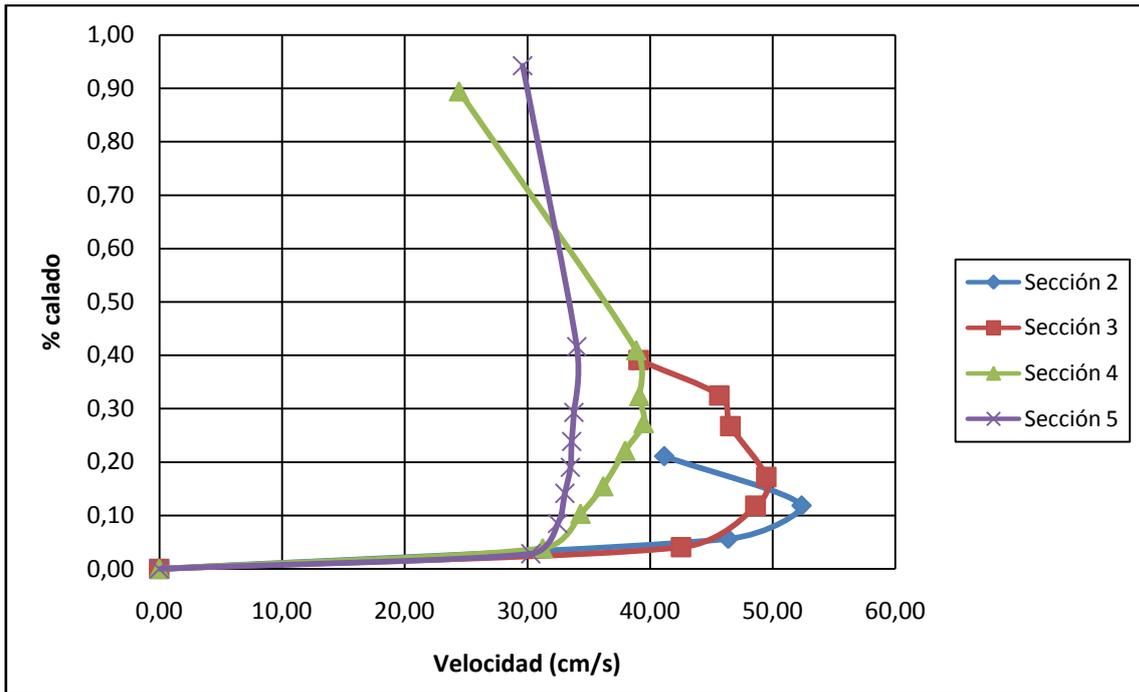


Figura A.I.9. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 8.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

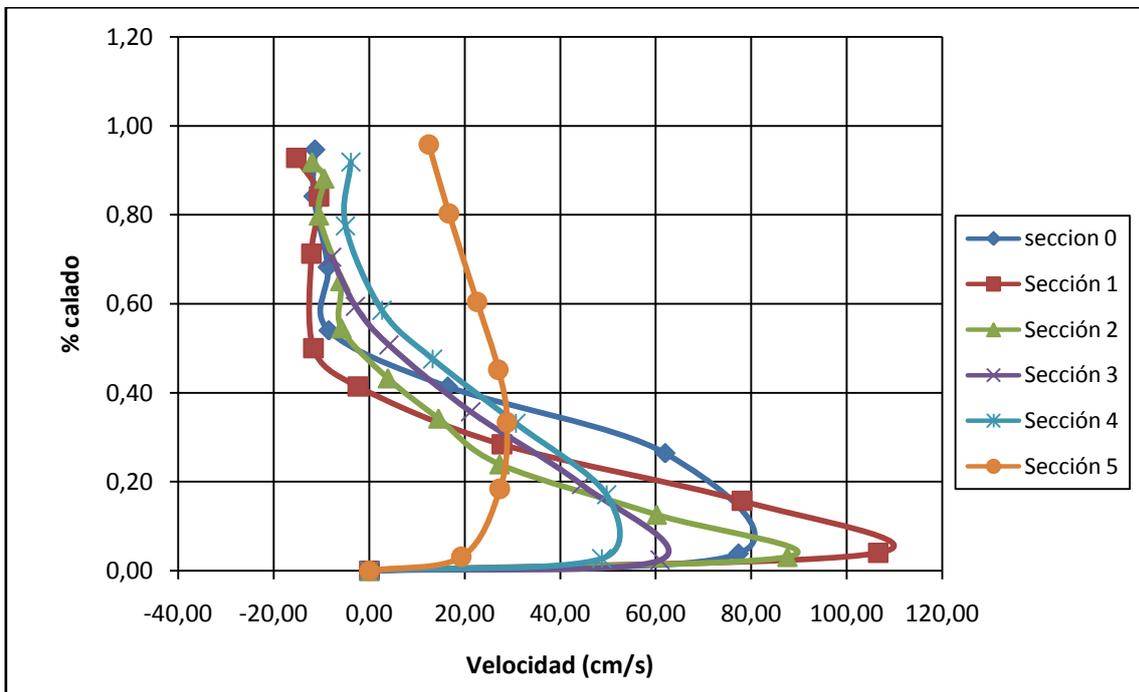


Figura A.I.10. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a 14.8cm y $Q=8.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

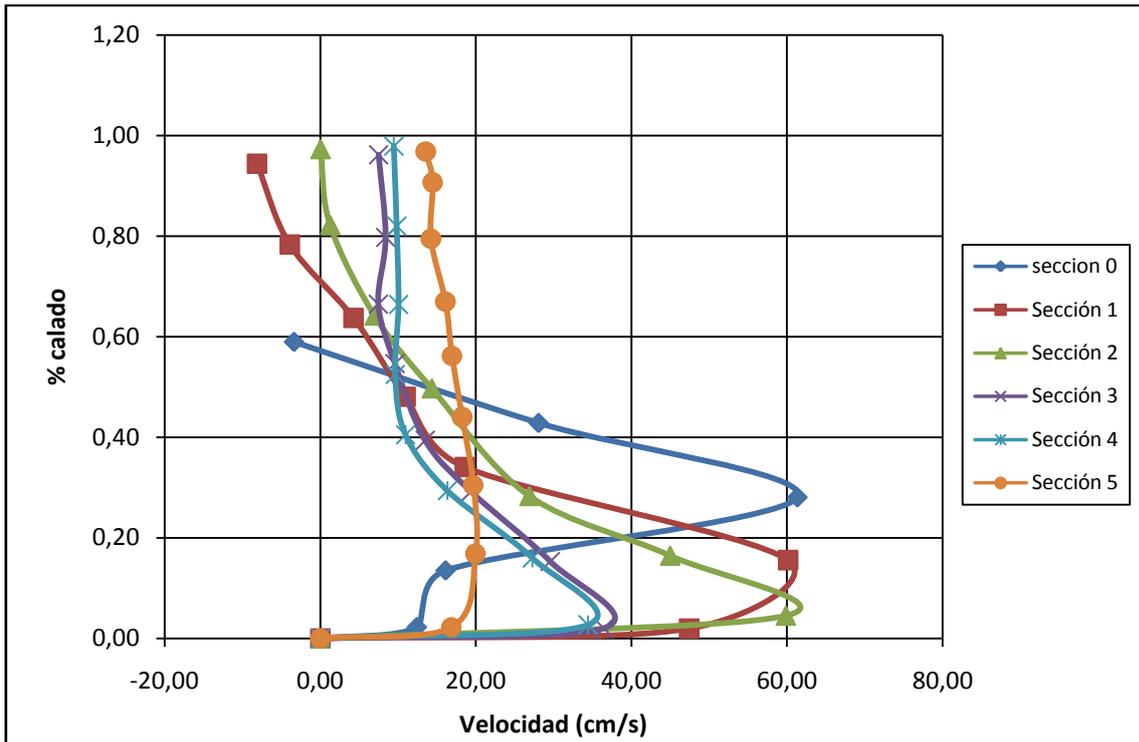


Figura A.I.11. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a $14.8 + H/2$ cm (18 cm) y $Q=8.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

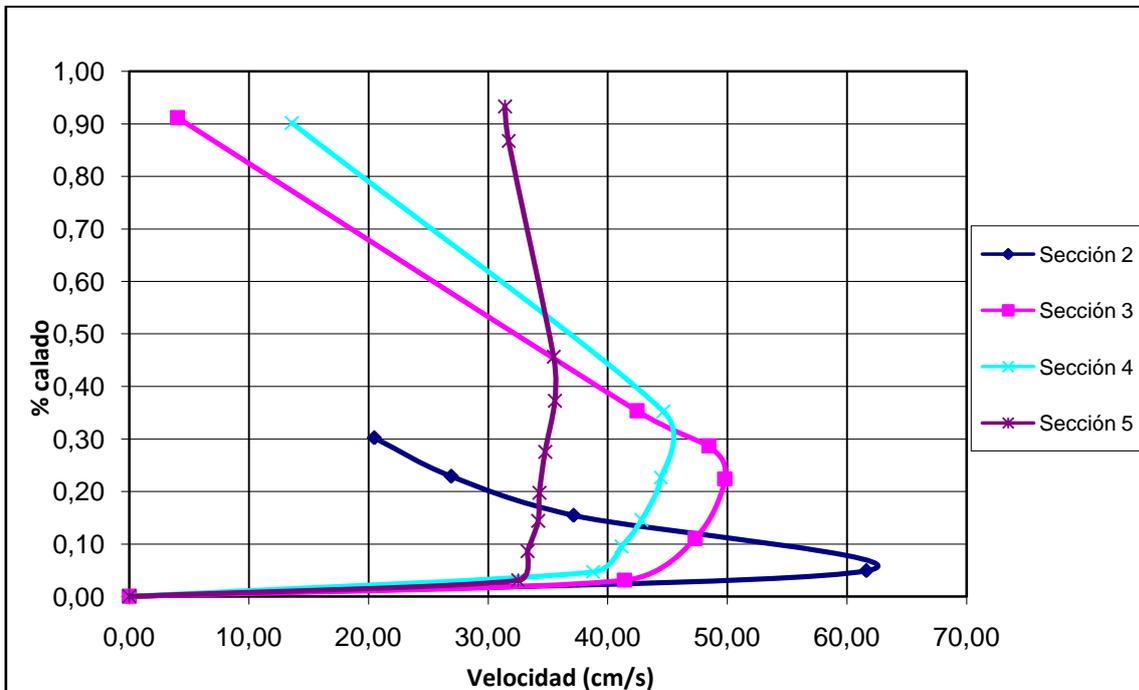


Figura A.I.12. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 9.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

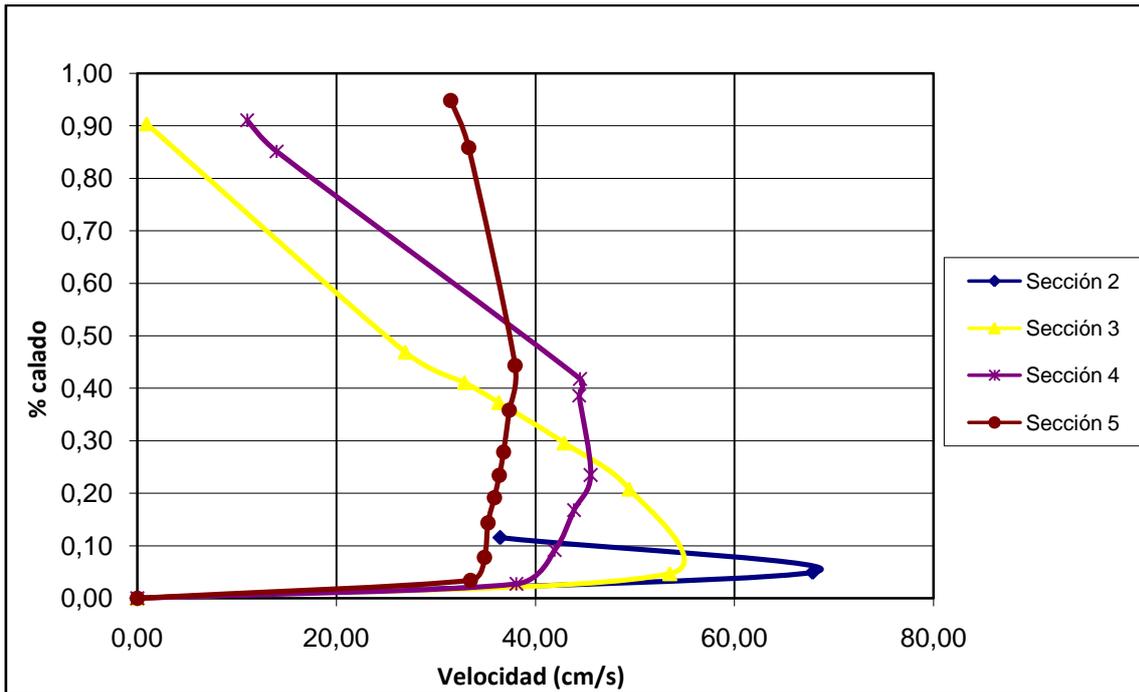


Figura A.I.13. Perfiles de velocidad para resaltos libres y $Q= 10.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

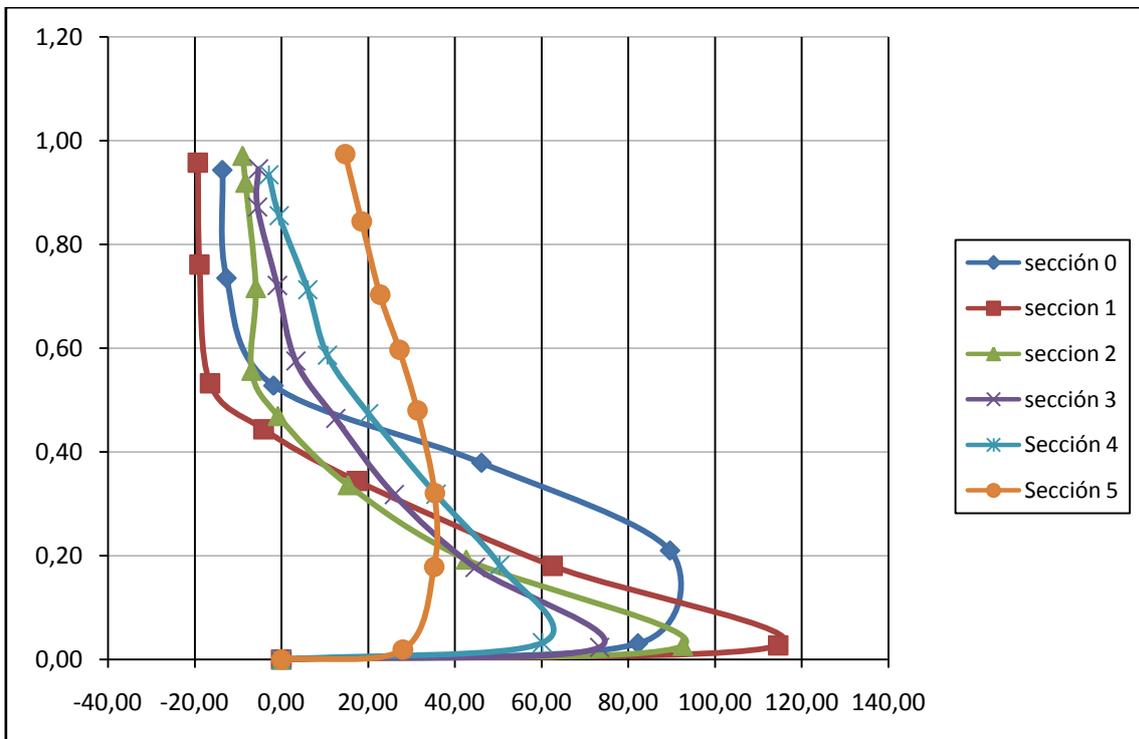


Figura A.I.14. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a 14.8 cm y $Q=10.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

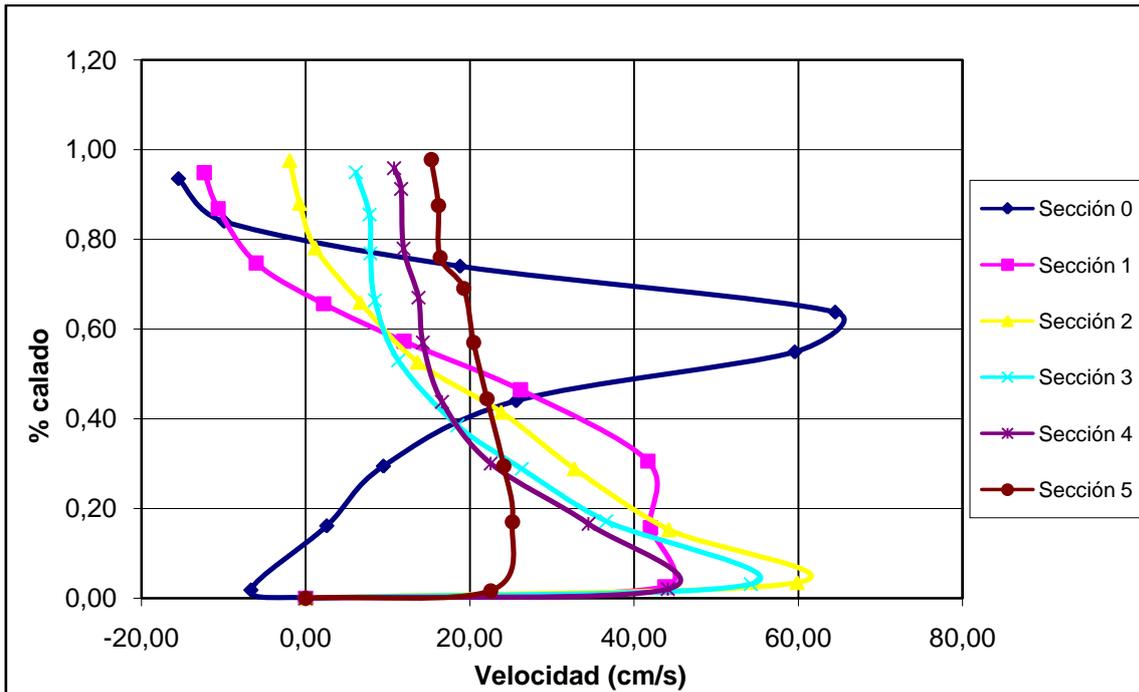


Figura A.I.15. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a 14.8 +H/2 cm (18.1 cm) y Q=10.5 m³/h.

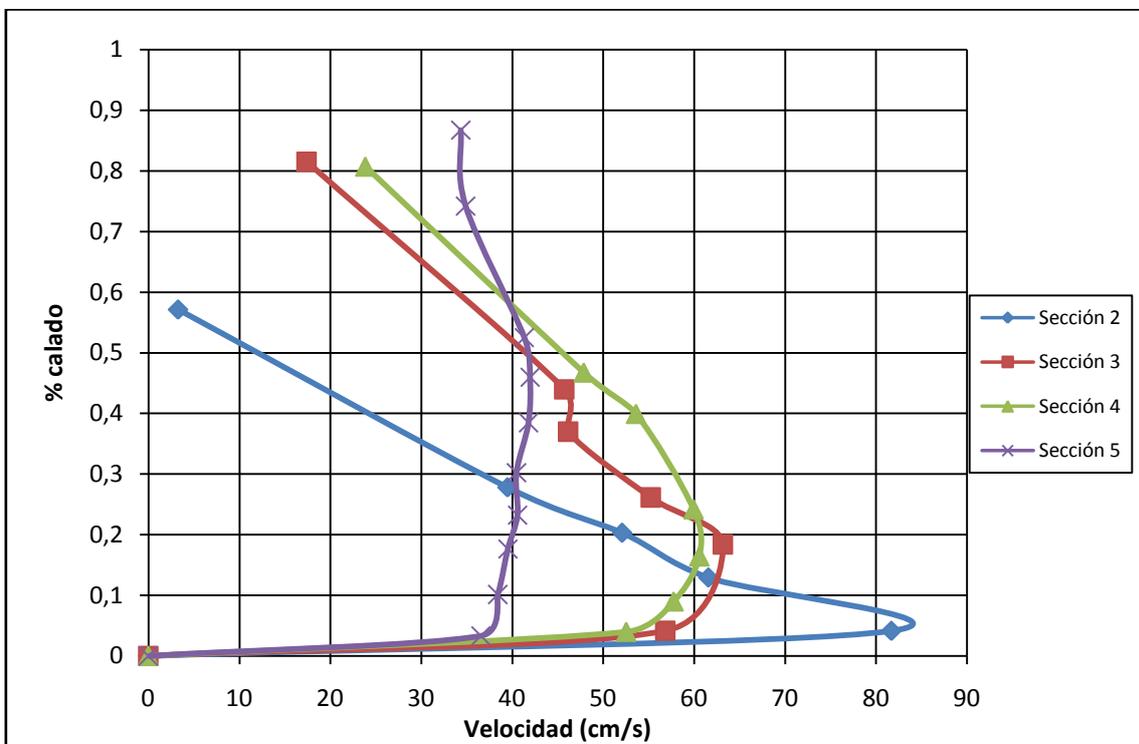


Figura A.I.16. Perfiles de velocidad para resaltos libres y Q= 12 m³/h.

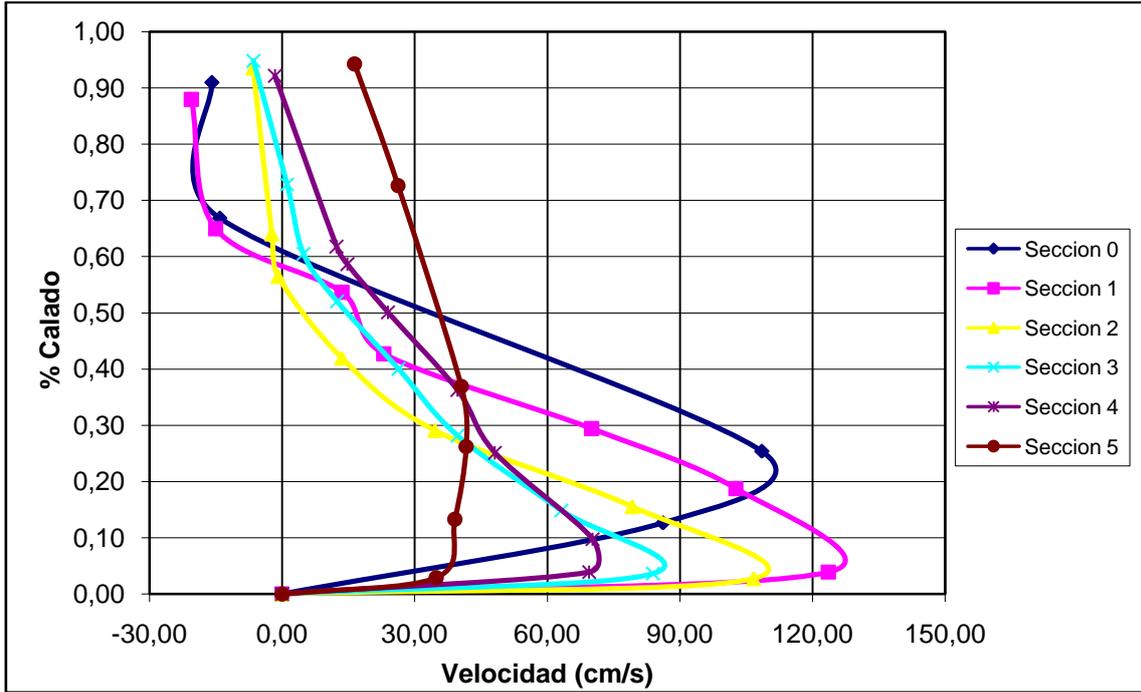


Figura A.I.17. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a 14.8 cm y $Q=12 \text{ m}^3/\text{h}$.

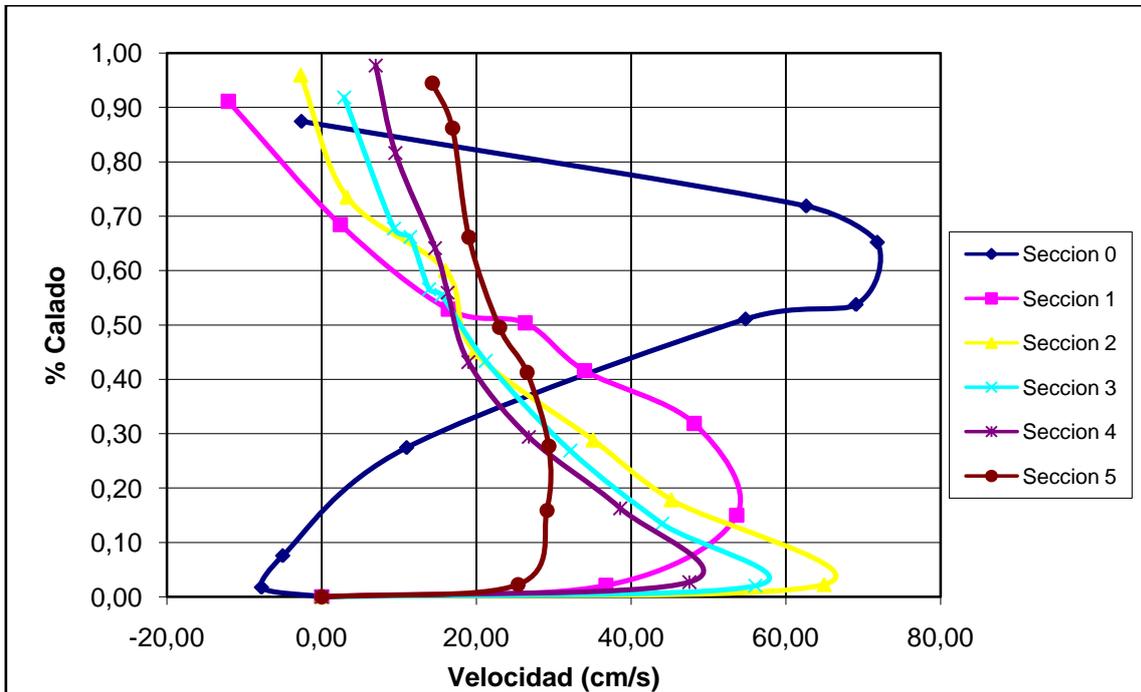


Figura A.I.18. Perfiles de velocidad para resalto sumergido a $14.8 + H/2 \text{ cm}$ (18.5 cm) y $Q=12 \text{ m}^3/\text{h}$.

ANEXO II

RESULTADOS DEL FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO

El Anexo II contiene los datos de velocidad una vez filtrados digitalmente. La información se muestra tabulada en función del caudal y el desplazamiento. Para cada punto medido se muestra la velocidad, la distancia desde el fondo del canal al volumen de control y el número de filtrados realizados.

A continuación se explica la nomenclatura de los puntos:

Las tres primeras cifras corresponden al caudal de trabajo tomado del caudalímetro en m³/h.

La cuarta y quinta cifra hace referencia a la apertura de la compuerta (compuerta) o calado contraído (azud)

La sexta cifra hace referencia al tipo de resalto siendo:

0 para resaltos libres

1 para resaltos sumergidos, primera sumergencia

2 para resaltos sumergidos, segunda sumergencia

3 para resaltos sumergidos, tercera sumergencia

La séptima cifra corresponde a la sección dentro del resalto y fuera del mismo en la que han sido medidos los puntos.

La letra final corresponde al orden de muestreo en cada sección respecto de la solera.

Sea “a” el punto más cercano a la solera del canal para cada una de las secciones.

Por ejemplo, un punto tomado con un caudal de 4.5 m³/h, a 0.35 cm de la solera (sería el punto más cercano a la solera), con un calado contraído de 1 cm, en la sección 3 del resalto libre, se nombraría: 0451003a (045→4.5m³/h; 10→ 1.0cm; 0→ resalto libre; 3→ sección 3; a→ punto más cercano a la solera)

Datos filtrados de resalto libre al pie de aliviadero con Q=4.5 m ³ /h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Seccion 3							
0451003a	32.07	0.60	0.02	1	7.1	35.41	47.22
0451003b	31.62	1.69	0.05	1	7.1	35.41	47.22
Seccion 4							
0451003a	18.79	0.36	0.01	0	7.35	47.22	47.22
0451003b	18.28	0.86	0.03	1	7.35	47.22	47.22
0451003c	17.44	1.27	0.04	2	7.35	47.22	47.22
Seccion 5							
0451004a	23.61	0.35	0.05	1	7.55	105.11	47.22
0451004b	23.36	1.19	0.16	0	7.55	105.11	47.22
0451004c	23.05	1.80	0.24	2	7.55	105.11	47.22

Datos filtrados de resalto sumergido a 14.8 cm de aliviadero con Q=4.5 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Seccion 0							
0451010a	75.31	0.39	0.03	1	13.39	0	47.22
0451010b	59.80	1.43	0.11	4	13.39	0	47.22
0451010c	16.29	3.05	0.23	1	13.39	0	47.22
0451010d	2.77	4.08	0.30	0	13.39	0	47.22
0451010e	-6.52	5.58	0.42	3	13.39	0	47.22
0451010f	-7.96	6.90	0.52	3	13.39	0	47.22
0451010g	-10.21	10.54	0.79	1	13.39	0	47.22
0451010h	-8.92	12.61	0.94	1	13.39	0	47.22
Seccion 1							
0451011a	82.27	0.47	0.04	1.00	13.39	11.80	47.22
0451011b	68.68	1.78	0.13	1.00	13.39	11.80	47.22
0451011c	45.32	2.65	0.20	1.00	13.39	11.80	47.22
0451011d	14.38	4.44	0.33	1.00	13.39	11.80	47.22
0451011e	1.76	5.37	0.40	1.00	13.39	11.80	47.22
0451011f	-7.27	6.47	0.48	4.00	13.39	11.80	47.22
0451011g	-14.74	10.85	0.81	0.00	13.39	11.80	47.22
0451011h	-9.72	12.68	0.95	1.00	13.39	11.80	47.22
Seccion 2							
0451012a	19.22	0.39	0.03	0.00	13.39	23.61	47.22
0451012b	59.91	1.34	0.10	1.00	13.39	23.61	47.22
0451012c	40.89	2.64	0.20	1.00	13.39	23.61	47.22
0451012d	21.98	4.02	0.30	1.00	13.39	23.61	47.22
0451012e	18.11	4.40	0.33	1.00	13.39	23.61	47.22
0451012f	4.64	5.58	0.42	1.00	13.39	23.61	47.22
0451012g	-2.30	6.47	0.48	2.00	13.39	23.61	47.22
0451012h	-15.95	10.91	0.81	3.00	13.39	23.61	47.22
0451012i	-14.80	12.80	0.96	1.00	13.39	23.61	47.22
Seccion 3							
0451013a	31.08	0.33	0.02	1.00	13.53	35.41	47.22
0451013b	45.94	2.03	0.15	0.00	13.53	35.41	47.22
0451013c	29.76	2.98	0.22	1.00	13.53	35.41	47.22
0451013d	24.26	4.10	0.30	1.00	13.53	35.41	47.22
0451013e	16.50	5.04	0.37	1.00	13.53	35.41	47.22
0451013f	3.50	6.49	0.48	0.00	13.53	35.41	47.22
0451013g	0.19	7.13	0.53	0.00	13.53	35.41	47.22
0451013h	-8.24	11.39	0.84	3.00	13.53	35.41	47.22
0451013i	-12.97	12.74	0.94	4.00	13.53	35.41	47.22
Seccion 4							
0451014a	38.57	0.38	0.03	0	13.75	47.22	47.22
0451014b	48.85	1.6	0.12	1	13.75	47.22	47.22
0451014c	35.73	2.85	0.21	0	13.75	47.22	47.22
0451014d	25.48	4.32	0.31	0	13.75	47.22	47.22
0451014e	14.78	5.54	0.40	0	13.75	47.22	47.22
0451014f	7.84	6.47	0.47	0	13.75	47.22	47.22
0451014g	-1.51	7.54	0.55	4	13.75	47.22	47.22
0451014h	-2.36	10.53	0.77	0	13.75	47.22	47.22
0451014i	-10.84	12.97	0.94	4	13.75	47.22	47.22
Seccion 5							
0451015a	2.41	0.37	0.03	0	14.8	105.11	47.22
0451015b	7.37	1.48	0.10	0	14.8	105.11	47.22
0451015c	7.94	2.57	0.17	0	14.8	105.11	47.22
0451015d	8.65	3.89	0.26	1	14.8	105.11	47.22
0451015e	11.07	5.46	0.37	0	14.8	105.11	47.22
0451015f	10.35	6.95	0.47	1	14.8	105.11	47.22
0451015g	12.05	8.33	0.56	1	14.8	105.11	47.22
0451015h	12.41	12.25	0.83	1	14.8	105.11	47.22
0451015i	11.62	14.42	0.97	0	14.8	105.11	47.22

Datos filtrados de resalto sumergido a 16.2 cm de aliviadero con Q=4.5 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Seccion 0							
0451020a	40.47	0.37	0.02	1	15.2	0	47.22
0451020b	52.08	1.76	0.12	1	15.2	0	47.22
0451020c	20.90	3.76	0.25	1	15.2	0	47.22
0451020d	1.48	5.29	0.35	0	15.2	0	47.22
0451020e	-3.28	7.14	0.47	3	15.2	0	47.22
0451020f	-6.98	10.40	0.68	2	15.2	0	47.22
0451020g	-6.30	14.38	0.95	2	15.2	0	47.22
Seccion 1							
0451021a	46.58	0.4	0.03	1	15.4	11.80	47.22
0451021b	36.83	1.76	0.11	1	15.4	11.80	47.22
0451021c	10.12	3.43	0.22	1	15.4	11.80	47.22
0451021d	9.01	4.98	0.32	1	15.4	11.80	47.22
0451021e	-0.08	6.67	0.43	2	15.4	11.80	47.22
0451021f	-4.79	8.45	0.55	2	15.4	11.80	47.22
0451021g	-5.31	9.62	0.62	3	15.4	11.80	47.22
0451021h	-6.72	11.4	0.74	0	15.4	11.80	47.22
0451021i	-9.11	14.62	0.95	3	15.4	11.80	47.22
Seccion 2							
0451022a	38.39	0.43	0.03	1	15.5	23.61	47.22
0451022b	32.23	2.03	0.13	1	15.5	23.61	47.22
0451022c	8.83	3.45	0.22	1	15.5	23.61	47.22
0451022d	10.05	4.93	0.32	2	15.5	23.61	47.22
0451022e	0.84	6.26	0.40	1	15.5	23.61	47.22
0451022f	-4.63	8.18	0.53	3	15.5	23.61	47.22
0451022g	-6.64	9.64	0.62	3	15.5	23.61	47.22
0451022h	-7.78	11.51	0.74	2	15.5	23.61	47.22
0451022i	-10.76	15	0.97	1	15.5	23.61	47.22
Seccion 3							
0451023a	38.43	0.41	0.03	1	15.6	35.41	47.22
0451023b	31.69	1.68	0.11	1	15.6	35.41	47.22
0451023c	12.78	3.44	0.22	0	15.6	35.41	47.22
0451023d	9.51	6.61	0.42	0	15.6	35.41	47.22
0451023e	0.80	6.65	0.43	1	15.6	35.41	47.22
0451023f	-4.94	8.56	0.55	3	15.6	35.41	47.22
0451023g	-6.70	9.59	0.61	3	15.6	35.41	47.22
0451023h	-6.36	11.59	0.74	2	15.6	35.41	47.22
0451023i	-13.19	14.83	0.95	4	15.6	35.41	47.22
Seccion 4							
0451024a	27.93	0.42	0.03	1	15.7	47.22	47.22
0451024b	26.86	2.03	0.13	0	15.7	47.22	47.22
0451024c	8.58	3.45	0.22	0	15.7	47.22	47.22
0451024d	10.68	4.95	0.32	1	15.7	47.22	47.22
0451024e	5.40	6.19	0.39	0	15.7	47.22	47.22
0451024f	-1.74	8.13	0.52	0	15.7	47.22	47.22
0451024g	-5.25	9.65	0.61	3	15.7	47.22	47.22
0451024h	-4.14	11.25	0.72	2	15.7	47.22	47.22
0451024i	-12.92	14.93	0.95	4	15.7	47.22	47.22
Seccion 5							
0451025a	4.88	0.32	0.02	0	16.2	105.11	47.22
0451025b	10.47	2.08	0.13	0	16.2	105.11	47.22
0451025c	12.98	4	0.25	0	16.2	105.11	47.22
0451025d	15.76	6.03	0.37	1	16.2	105.11	47.22
0451025e	14.46	7.43	0.46	1	16.2	105.11	47.22
0451025f	14.01	8.97	0.55	0	16.2	105.11	47.22
0451025g	11.68	10.19	0.63	1	16.2	105.11	47.22
0451025h	9.48	11.68	0.72	1	16.2	105.11	47.22
0451025i	4.09	15.57	0.96	3	16.2	105.11	47.22

Datos filtrados del resalto libre al pie del aliviadero con Q =5.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 2							
0551402a	53.35	0.44	5.87	2	7.5	23.22	34.82
0551402b	53.23	0.72	9.60	2	7.5	23.22	34.82
0551402c	48.05	1.42	18.93	4	7.5	23.22	34.82
Sección 3							
0551403a	28.88	0.41	5.19	3	7.9	34.82	34.82
0551403b	35.54	0.78	9.87	4	7.9	34.82	34.82
0551403c	35.73	1.25	15.82	3	7.9	34.82	34.82
0551403d	30.45	2.11	26.71	2	7.9	34.82	34.82
Sección 4							
0551404a	19.86	0.34	4.15	1	8.2	46.43	34.82
0551404b	30.34	0.74	9.02	2	8.2	46.43	34.82
0551404c	31.10	1.01	12.32	2	8.2	46.43	34.82
0551404d	31.97	1.64	20.00	2	8.2	46.43	34.82
0551404e	31.57	2.15	26.22	2	8.2	46.43	34.82
Sección 5							
0551405a	25.03	0.3	3.53	1	8.5	105.72	34.82
0551405b	27.21	0.8	9.41	1	8.5	105.72	34.82
0551405c	28.04	1.45	17.06	1	8.5	105.72	34.82
0551405d	28.26	1.82	21.41	1	8.5	105.72	34.82
0551405e	28.60	2.42	28.47	1	8.5	105.72	34.82

Datos filtrados del resalto sumergido a 14.8 cm del aliviadero con Q =5.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
0551410a	54.43	0.32	2.38	4	13.45	0	46.43
0551410b	79.85	1.5	11.15	1	13.45	0	46.43
0551410c	37.74	2.85	21.19	2	13.45	0	46.43
0551410d	14.29	3.86	28.70	3	13.45	0	46.43
0551410e	-1.55	5.13	38.14	4	13.45	0	46.43
0551410f	-6.40	6.35	47.21	4	13.45	0	46.43
0551410g	-7.28	7.76	57.70	4	13.45	0	46.43
0551410h	-10.37	9.29	69.07	2	13.45	0	46.43
0551410i	-10.98	11.46	85.20	1	13.45	0	46.43
0551410j	-11.22	12.68	94.28	1	13.45	0	46.43
Sección 1							
0551411a	91.73	0.34	2.52	1	13.5	11.6	46.43
0551411b	54.11	2.42	17.93	1	13.5	11.6	46.43
0551411c	18.76	4.15	30.74	1	13.5	11.6	46.43
0551411d	-7.43	5.93	43.93	1	13.5	11.6	46.43
0551411e	-12.65	7.57	56.07	3	13.5	11.6	46.43
0551411f	-11.17	9.5	70.37	3	13.5	11.6	46.43
0551411g	-15.29	11.6	85.93	2	13.5	11.6	46.43
0551411h	-12.42	13.1	97.04	1	13.5	11.6	46.43
Sección 2							
0551412a	81.64	0.33	2.43	1	13.6	23.22	46.43
0551412b	53.96	2.35	17.28	1	13.6	23.22	46.43
0551412c	17.17	4.36	32.06	3	13.6	23.22	46.43
0551412d	-4.55	6.2	45.59	3	13.6	23.22	46.43
0551412e	-13.18	7.5	55.15	3	13.6	23.22	46.43
0551412f	-16.57	11.21	82.43	3	13.6	23.22	46.43
0551412g	-16.52	13.1	96.32	2	13.6	23.22	46.43
Sección 3							
0551413a	61.19	0.39	2.85	1	13.7	34.82	46.43
0551413b	44.54	2.4	17.52	1	13.7	34.82	46.43
0551413c	19.09	4.43	32.34	2	13.7	34.82	46.43
0551413d	2.21	6.22	45.40	2	13.7	34.82	46.43
0551413e	-7.83	8.01	58.47	2	13.7	34.82	46.43
0551413f	-11.37	11.46	83.65	3	13.7	34.82	46.43
0551413g	-14.92	12.71	92.77	2	13.7	34.82	46.43
Sección 4							
0551414a	46.18	0.37	2.66	2	13.9	46.43	46.43
0551414b	42.52	2.5	17.99	2	13.9	46.43	46.43
0551414c	25.57	4.3	30.94	3	13.9	46.43	46.43
0551414d	10.89	5.96	42.88	3	13.9	46.43	46.43
0551414e	1.84	7.2	51.80	3	13.9	46.43	46.43
0551414f	-2.74	8.14	58.56	3	13.9	46.43	46.43
0551414g	-5.49	11.45	82.37	1	13.9	46.43	46.43
0551414h	-10.52	13.06	93.96	1	13.9	46.43	46.43
Sección 5							
0551415a	7.69	0.38	2.57	1	14.8	105.72	46.43
0551415b	13.85	2.43	16.42	1	14.8	105.72	46.43
0551415c	15.82	4.07	27.50	1	14.8	105.72	46.43
0551415d	17.17	5.88	39.73	1	14.8	105.72	46.43
0551415e	15.90	8.87	59.93	1	14.8	105.72	46.43
0551415f	13.16	11.71	79.12	1	14.8	105.72	46.43
0551415g	13.45	13.8	93.24	1	14.8	105.72	46.43

Datos filtrados del resalto sumergido a 16.2 cm del aliviadero con Q =5.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
0551420a	57.891167	0.49	3.28	4	14.95	0	46.43
0551420b	63.81400888	2.42	16.19	2	14.95	0	46.43
0551420c	32.03654488	4.02	26.89	2	14.95	0	46.43
0551420d	3.847957859	5.93	39.67	2	14.95	0	46.43
0551420e	-6.093753821	7.49	50.10	2	14.95	0	46.43
0551420f	-8.236924768	9.34	62.47	1	14.95	0	46.43
0551420g	-8.217722168	10.76	71.97	1	14.95	0	46.43
0551420h	-8.613106836	12.46	83.34	1	14.95	0	46.43
0551420i	-7.86401114	14.29	95.59	1	14.95	0	46.43
Sección 1							
0551421a	74.48536993	0.4	2.67	1	15	11.6	46.43
0551421b	50.41244708	2.46	16.40	3	15	11.6	46.43
0551421c	21.96963468	4.36	29.07	3	15	11.6	46.43
0551421d	-0.728810774	6.26	41.73	2	15	11.6	46.43
0551421e	-7.352573353	7.77	51.80	2	15	11.6	46.43
0551421f	-9.840404393	9.3	62.00	2	15	11.6	46.43
0551421g	-8.078132324	10.84	72.27	1	15	11.6	46.43
0551421h	-10.94010742	12.59	83.93	1	15	11.6	46.43
0551421i	-10.37468534	14.43	96.20	1	15	11.6	46.43
Sección 2							
0551422a	63.76683488	0.32	2.12	1	15.1	23.22	46.43
0551422b	40.65906922	2.61	17.28	2	15.1	23.22	46.43
0551422c	18.89324111	4.4	29.14	3	15.1	23.22	46.43
0551422d	-0.893204031	6.26	41.46	4	15.1	23.22	46.43
0551422e	-7.663717004	7.85	51.99	2	15.1	23.22	46.43
0551422f	-11.2503837	9.16	60.66	2	15.1	23.22	46.43
0551422g	-9.14901359	11.16	73.91	2	15.1	23.22	46.43
0551422h	-13.85729492	13.05	86.42	1	15.1	23.22	46.43
0551422i	-14.20905613	14.63	96.89	3	15.1	23.22	46.43
Sección 3							
0551423a	56.60700866	0.41	2.70	1	15.2	34.82	46.43
0551423b	35.86355287	2.53	16.64	2	15.2	34.82	46.43
0551423c	20.29102811	4.27	28.09	2	15.2	34.82	46.43
0551423d	6.171569226	6.14	40.39	2	15.2	34.82	46.43
0551423e	-3.698292988	8.04	52.89	2	15.2	34.82	46.43
0551423f	-8.966189421	9.55	62.83	2	15.2	34.82	46.43
0551423g	-7.898513855	11.35	74.67	2	15.2	34.82	46.43
0551423h	-13.27001257	13.07	85.99	2	15.2	34.82	46.43
0551423i	-12.67127303	14.66	96.45	4	15.2	34.82	46.43
Sección 4							
0551424a	47.0668605	0.4	2.60	1	15.4	46.43	46.43
0551424b	35.62272748	2.53	16.43	1	15.4	46.43	46.43
0551424c	23.25579073	4.21	27.34	2	15.4	46.43	46.43
0551424d	11.80903913	6.01	39.03	2	15.4	46.43	46.43
0551424e	0.898012446	7.97	51.75	2	15.4	46.43	46.43
0551424f	-4.611766405	9.39	60.97	2	15.4	46.43	46.43
0551424g	-4.659667969	11.52	74.81	1	15.4	46.43	46.43
0551424h	-11.04232753	13.43	87.21	3	15.4	46.43	46.43
0551424i	-11.31387695	14.78	95.97	1	15.4	46.43	46.43
Sección 5							
0551425a	9.00072845	0.42	2.59	1	16.2	105.72	46.43
0551425b	15.89561261	2.45	15.12	1	16.2	105.72	46.43
0551425c	18.67405649	4.31	26.60	1	16.2	105.72	46.43
0551425d	19.36007499	6.5	40.12	1	16.2	105.72	46.43
0551425e	16.07933474	8.6	53.09	1	16.2	105.72	46.43
0551425f	14.41218094	9.95	61.42	1	16.2	105.72	46.43
0551425g	9.206049596	12.9	79.63	1	16.2	105.72	46.43
0551425h	6.703402212	15.45	95.37	1	16.2	105.72	46.43

Datos filtrados del resalto libre al pie del aliviadero con Q =6.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 2							
0651702a	49.95	0.45	6.00	2	7.5	24.41	48.83
0651702b	40.17	1.45	19.33	2	7.5	24.41	48.83
Sección 3							
0651703a	25.18	0.33	3.98	2	8.29	36.62	48.83
0651703b	31.96	0.8	9.65	1	8.29	36.62	48.83
0651703c	38.64	1.27	15.32	3	8.29	36.62	48.83
0651703d	40.12	2.61	31.48	3	8.29	36.62	48.83
Sección 4							
0651704a	27.46	0.28	3.22	2	8.7	48.83	48.83
0651704b	32.63	0.9	10.34	1	8.7	48.83	48.83
0651704c	35.98	1.78	20.46	4	8.7	48.83	48.83
0651704d	36.71	2.71	31.15	3	8.7	48.83	48.83
Sección 5							
0651705a	26.77	0.46	5.26	1	8.74	105.92	48.83
0651705b	29.73	0.74	8.47	1	8.74	105.92	48.83
0651705c	30.05	1.57	17.96	1	8.74	105.92	48.83
0651705d	29.80	1.79	20.48	1	8.74	105.92	48.83
0651705e	30.21	2.18	24.94	1	8.74	105.92	48.83
0651705f	29.33	2.77	31.69	1	8.74	105.92	48.83

Datos filtrados de resalto libre al pie de aliviadero con Q=7.5 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Seccion 2							
0751902a	52.94	0.38	0.05	1	7.8	24.74	49.47
0751902b	47.38	1.24	0.16	1	7.8	24.74	49.47
0751902c	36.20	1.96	0.25	1	7.8	24.74	49.47
Seccion 3							
0751903a	41.01	0.36	0.04	0	8.7	37.10	49.47
0751903b	45.20	0.89	0.10	0	8.7	37.10	49.47
0751903c	44.62	1.38	0.16	0	8.7	37.10	49.47
0751903d	42.32	1.97	0.23	1	8.7	37.10	49.47
0751903e	40.47	2.7	0.31	1	8.7	37.10	49.47
Seccion 4							
07519024a	32.51	0.33	0.04	0	8.9	49.47	49.47
07519024b	35.49	0.89	0.10	0	8.9	49.47	49.47
07519024c	35.61	1.41	0.16	0	8.9	49.47	49.47
07519024d	33.58	1.85	0.21	0	8.9	49.47	49.47
07519024e	33.74	2.19	0.25	0	8.9	49.47	49.47
07519024f	34.85	3.03	0.34	0	8.9	49.47	49.47
Seccion 5							
0751905a	30.05	0.32	0.03	0	9.5	106.24	49.47
0751905b	31.58	0.85	0.09	0	9.5	106.24	49.47
0751905c	31.92	1.38	0.15	0	9.5	106.24	49.47
0751905d	32.56	2	0.21	0	9.5	106.24	49.47
0751905e	32.56	2.65	0.28	0	9.5	106.24	49.47
0751905f	30.24	3.31	0.35	0	9.5	106.24	49.47

Datos filtrados de resalto libre al pie de aliviadero con Q=8.5 m ³ /h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Seccion 2							
0852102a	46.38	0.45	0.06	1	8	26.33	52.67
0852102b	52.36	0.95	0.12	1	8	26.33	52.67
0852102c	41.16	1.69	0.21	1	8	26.33	52.67
Seccion 3							
0852103a	42.54	0.36	0.04	0	8.9	39.50	52.67
0852103b	48.61	1.05	0.12	1	8.9	39.50	52.67
0852103c	49.48	1.53	0.17	1	8.9	39.50	52.67
0852103d	46.56	2.38	0.27	1	8.9	39.50	52.67
0852103e	45.67	2.89	0.32	1	8.9	39.50	52.67
0852103f	39.09	3.48	0.39	3	8.9	39.50	52.67
Sección 4							
0852104a	31.25	0.36	0.04	1	9.3	52.67	52.67
0852104b	34.33	0.96	0.10	1	9.3	52.67	52.67
0852104c	36.18	1.44	0.15	0	9.3	52.67	52.67
0852104d	37.97	2.06	0.22	0	9.3	52.67	52.67
0852104e	39.48	2.54	0.27	1	9.3	52.67	52.67
0852104f	39.13	3.01	0.32	0	9.3	52.67	52.67
0852104g	38.87	3.81	0.41	1	9.3	52.67	52.67
0852104h	24.43	8.32	0.89	1	9.3	52.67	52.67
Sección 5							
0852105a	30.29	0.28	0.03	2	9.9	107.83	52.67
0852105b	32.48	0.84	0.08	2	9.9	107.83	52.67
0852105c	33.06	1.40	0.14	3	9.9	107.83	52.67
0852105d	33.51	1.88	0.19	3	9.9	107.83	52.67
0852105e	33.61	2.36	0.24	1	9.9	107.83	52.67
0852105f	33.80	2.90	0.29	1	9.9	107.83	52.67
0852105g	32.19	3.33	0.34	2	9.9	107.83	52.67
0852105h	34.03	4.12	0.42	2	9.9	107.83	52.67
0852105i	29.62	9.33	0.94	1	9.9	107.83	52.67
0952405i	31.41	9.8	0.00	1	10.5	108.02	54.22

Datos filtrados del resalto sumergido a 14.8 cm del aliviadero con Q =8.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
0852110a	77.36	0.48	3.84	1	12.5	0	52.67
0852110b	53.03	1.5	12.00	0	12.5	0	52.67
0852110c	61.90	3.3	26.40	1	12.5	0	52.67
0852110d	16.44	5.17	41.36	1	12.5	0	52.67
0852110e	-8.60	6.75	54.00	3	12.5	0	52.67
0852110f	-8.66	8.53	68.24	3	12.5	0	52.67
0852110g	-11.68	10.52	84.16	1	12.5	0	52.67
0852110h	-11.36	11.83	94.64	3	12.5	0	52.67
Sección 1							
0852111a	106.70	0.52	4.00	1	13	0.25	52.67
0852111b	78.53	2.04	15.69	1	13	0.25	52.67
0852111c	27.74	3.69	28.38	1	13	0.25	52.67
0852111d	-2.75	5.38	41.38	2	13	0.25	52.67
0852111e	-11.79	6.5	50.00	1	13	0.25	52.67
0852111f	-12.12	9.26	71.23	0	13	0.25	52.67
0852111g	-10.58	10.93	84.08	1	13	0.25	52.67
0852111h	-15.34	12.06	92.77	1	13	0.25	52.67
Sección 2							
0852112a	87.80	0.42	3.11	1	13.5	0.5	52.67
0852112b	60.21	1.7	12.59	0	13.5	0.5	52.67
0852112c	27.31	3.23	23.93	1	13.5	0.5	52.67
0852112d	14.46	4.62	34.22	1	13.5	0.5	52.67
0852112e	3.87	5.84	43.26	2	13.5	0.5	52.67
0852112f	-6.32	7.36	54.52	0	13.5	0.5	52.67
0852112g	-6.25	8.79	65.11	0	13.5	0.5	52.67
0852112h	-10.59	10.78	79.85	0	13.5	0.5	52.67
0852112i	-9.51	11.9	88.15	3	13.5	0.5	52.67
0852112j	-12.06	12.4	91.85	4	13.5	0.5	52.67
Sección 3							
0852113a	60.92	0.33	2.39	2	13.8	39.5	52.67
0852113b	44.52	2.67	19.35	1	13.8	39.5	52.67
0852113c	21.28	4.93	35.72	2	13.8	39.5	52.67
0852113d	4.12	7	50.72	2	13.8	39.5	52.67
0852113e	-2.90	8.2	59.42	4	13.8	39.5	52.67
0852113f	-7.89	9.72	70.43	4	13.8	39.5	52.67
0852113g	-8.00	12.47	90.36	4	13.8	39.5	52.67
Sección 4							
0852114a	48.68	0.46	3.11	1	14.1	52.67	52.67
0852114b	49.70	2.72	18.38	1	14.1	52.67	52.67
0852114c	30.72	4.93	33.31	1	14.1	52.67	52.67
0852114d	13.28	6.68	45.14	1	14.1	52.67	52.67
0852114e	2.66	8.94	60.41	1	14.1	52.67	52.67
0852114f	-5.05	11.88	80.27	1	14.1	52.67	52.67
0852114g	-3.86	14.17	95.74	4	14.1	52.67	52.67
Sección 5							
0852115a	19.30	0.46	3.11	1	14.8	107.83	52.67
0852115b	27.36	2.72	18.38	1	14.8	107.83	52.67
0852115c	28.86	4.93	33.31	1	14.8	107.83	52.67
0852115d	27.07	6.68	45.14	1	14.8	107.83	52.67
0852115e	22.58	8.94	60.41	1	14.8	107.83	52.67
0852115f	16.69	11.88	80.27	1	14.8	107.83	52.67
0852115g	12.49	14.17	95.74	1	14.8	107.83	52.67

Datos filtrados del resalto sumergido a 17.7 cm del aliviadero con Q =8.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
0852120a	12.40	0.37	2.24	1	16.5	0	52.67
0852120b	16.09	2.23	13.52	1	16.5	0	52.67
0852120c	61.31	4.63	28.06	1	16.5	0	52.67
0852120d	28.04	7.07	42.85	1	16.5	0	52.67
0852120e	41.24	9.21	55.82	2	16.5	0	52.67
0852120f	-3.47	9.73	58.97	4	16.5	0	52.67
0852120g	-10.05	11.29	68.42	1	16.5	0	52.67
0852120h	-11.31	15.84	96.00	1	16.5	0	52.67
Sección 1							
0852121a	47.43	0.33	1.98	1	16.7	0.25	52.67
0852121b	60.12	2.6	15.57	4	16.7	0.25	52.67
0852121c	18.60	5.69	34.07	1	16.7	0.25	52.67
0852121d	0.31	7.37	44.13	3	16.7	0.25	52.67
0852121e	21.30	8.02	48.02	1	16.7	0.25	52.67
0852121f	10.22	10.64	63.71	1	16.7	0.25	52.67
0852121g	-3.98	13.08	78.32	0	16.7	0.25	52.67
0852121h	-8.13	15.76	94.37	0	16.7	0.25	52.67
Sección 2							
0852122a	59.85	0.78	4.53	1	17.2	0.5	52.67
0852122b	44.98	2.83	16.45	1	17.2	0.5	52.67
0852122c	26.88	4.87	28.31	1	17.2	0.5	52.67
0852122d	6.11	7.32	42.56	3	17.2	0.5	52.67
0852122e	14.33	8.55	49.71	1	17.2	0.5	52.67
0852122f	6.97	11.04	64.19	1	17.2	0.5	52.67
0852122g	1.25	14.14	82.21	1	17.2	0.5	52.67
0852122h	0.02	16.73	97.27	1	17.2	0.5	52.67
Sección 3							
0852123a	36.44	0.36	2.03	1	17.7	39.5	52.67
0852123b	29.56	2.71	15.31	1	17.7	39.5	52.67
0852123c	19.37	5.17	29.21	2	17.7	39.5	52.67
0852123d	13.47	6.97	39.38	2	17.7	39.5	52.67
0852123e	9.59	9.67	54.63	2	17.7	39.5	52.67
0852123f	7.45	11.76	66.44	2	17.7	39.5	52.67
0852123g	8.38	14.11	79.72	2	17.7	39.5	52.67
0852123h	7.49	17.02	96.16	1	17.7	39.5	52.67
Sección 4							
0852124a	34.39	0.48	2.70	1	17.8	52.67	52.67
0852124b	27.24	2.85	16.01	1	17.8	52.67	52.67
0852124c	16.32	5.23	29.38	1	17.8	52.67	52.67
0852124d	10.95	7.21	40.51	1	17.8	52.67	52.67
0852124e	9.62	9.34	52.47	2	17.8	52.67	52.67
0852124f	10.05	11.82	66.40	1	17.8	52.67	52.67
0852124g	9.81	14.59	81.97	1	17.8	52.67	52.67
0852124h	9.44	17.42	97.87	1	17.8	52.67	52.67
Sección 5							
0852125a	16.84	0.4	2.22	1	18	107.83	52.67
0852125b	19.95	3.03	16.83	1	18	107.83	52.67
0852125c	19.68	5.48	30.44	1	18	107.83	52.67
0852125d	18.24	7.92	44.00	1	18	107.83	52.67
0852125e	16.92	10.11	56.17	1	18	107.83	52.67
0852125f	16.08	12.05	66.94	1	18	107.83	52.67
0852125g	14.21	14.3	79.44	1	18	107.83	52.67
0852125h	14.44	16.32	90.67	1	18	107.83	52.67
0852125i	13.55	17.42	96.78	1	18	107.83	52.67

Datos filtrados del resalto libre al pie del aliviadero con Q =9.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 2							
0952402a	61.62	0.44	4.89	2	9	27.1	54.22
0952402b	37.15	1.39	15.44	4	9	27.1	54.22
0952402c	26.92	2.06	22.89	4	9	27.1	54.22
0952402d	20.48	2.72	30.22	3	9	27.1	54.22
Sección 3							
0952403a	41.40	0.3	3.09	3	9.7	40.66	54.22
0952403b	47.30	1.07	11.03	2	9.7	40.66	54.22
0952403c	49.80	2.17	22.37	1	9.7	40.66	54.22
0952403d	48.46	2.78	28.66	1	9.7	40.66	54.22
0952403e	42.46	3.43	35.36	1	9.7	40.66	54.22
0952403f	4.02	8.85	91.24	4	9.7	40.66	54.22
Sección 4							
0952404a	38.77	0.48	4.66	3	10.3	54.22	54.22
0952404b	41.14	0.98	9.51	3	10.3	54.22	54.22
0952404c	42.81	1.5	14.56	3	10.3	54.22	54.22
0952404d	44.44	2.33	22.62	2	10.3	54.22	54.22
0952404e	44.65	3.63	35.24	2	10.3	54.22	54.22
0952404f	13.59	9.29	90.19	2	10.3	54.22	54.22
Sección 5							
0952405a	32.51	0.32	3.05	1	10.5	108.02	54.22
0952405b	33.30	0.9	8.57	1	10.5	108.02	54.22
0952405c	34.19	1.51	14.38	1	10.5	108.02	54.22
0952405d	34.30	2.07	19.71	1	10.5	108.02	54.22
0952405e	34.77	2.89	27.52	1	10.5	108.02	54.22
0952405f	35.59	3.91	37.24	1	10.5	108.02	54.22
0952405g	35.49	4.79	45.62	1	10.5	108.02	54.22
0952405h	31.72	9.11	86.76	1	10.5	108.02	54.22
0952405i	31.41	9.8	93.33	1	10.5	108.02	54.22

Datos filtrados del resalto libre al pie del aliadero con Q =10.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 2							
1052802a	67.84	0.44	4.94	1	8.9	26.5	53.03
1052802b	36.45	1.03	11.57	1	8.9	26.5	53.03
Sección 3							
1052803a	53.51	0.47	4.70	1	10	39.78	53.03
1052803b	49.44	2.08	20.80	2	10	39.78	53.03
1052803c	42.90	2.96	29.60	3	10	39.78	53.03
1052803d	36.33	3.73	37.30	1	10	39.78	53.03
1052803e	32.88	4.11	41.10	2	10	39.78	53.03
1052803f	26.93	4.69	46.90	2	10	39.78	53.03
1052803g	0.93	9.04	90.40	4	10	39.78	53.03
Sección 4							
1052804a	38.10	0.29	2.74	2	10.6	53.03	53.03
1052804b	41.93	0.97	9.15	3	10.6	53.03	53.03
1052804c	43.89	1.78	16.79	3	10.6	53.03	53.03
1052804d	45.56	2.49	23.49	4	10.6	53.03	53.03
1052804e	44.41	4.09	38.58	3	10.6	53.03	53.03
1052804f	44.49	4.43	41.79	2	10.6	53.03	53.03
1052804g	14.01	9.02	85.09	3	10.6	53.03	53.03
1052804h	11.05	9.65	91.04	2	10.6	53.03	53.03
Sección 5							
1052805a	33.46	0.37	3.43	1	10.8	108.02	53.03
1052805b	34.87	0.84	7.78	1	10.8	108.02	53.03
1052805c	35.22	1.55	14.35	1	10.8	108.02	53.03
1052805d	35.87	2.07	19.17	1	10.8	108.02	53.03
1052805e	36.36	2.53	23.43	1	10.8	108.02	53.03
1052805f	36.79	3.01	27.87	1	10.8	108.02	53.03
1052805g	37.36	3.87	35.83	1	10.8	108.02	53.03
1052805h	37.95	4.79	44.35	1	10.8	108.02	53.03
1052805i	33.29	9.27	85.83	1	10.8	108.02	53.03
1052805j	31.48	10.24	94.81	1	10.8	108.02	53.03

Datos filtrados del resalto sumergido a 14.8 cm del aliviadero con Q =10.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
1052710a	82.25	0.38	3.09	2	12.3	0	53.03
1052710b	89.63	2.58	20.98	4	12.3	0	53.03
1052710c	46.16	4.66	37.89	2	12.3	0	53.03
1052710d	-1.80	6.49	52.76	2	12.3	0	53.03
1052710e	-12.64	9.04	73.50	3	12.3	0	53.03
1052710f	-13.60	11.6	94.31	2	12.3	0	53.03
Sección 1							
1052711a	114.52	0.34	2.69	1	12.65	13.25	53.03
1052711b	62.53	2.28	18.02	1	12.65	13.25	53.03
1052711c	17.43	4.35	34.39	1	12.65	13.25	53.03
1052711d	-4.07	5.61	44.35	2	12.65	13.25	53.03
1052711e	-16.44	6.73	53.20	2	12.65	13.25	53.03
1052711f	-18.87	9.63	76.13	4	12.65	13.25	53.03
1052711g	-19.22	12.11	95.73	3	12.65	13.25	53.03
Sección 2							
1052712a	92.61	0.35	2.63	1	13.3	26.25	53.03
1052712b	42.64	2.56	19.25	1	13.3	26.25	53.03
1052712c	15.36	4.47	33.61	3	13.3	26.25	53.03
1052712d	-0.79	6.24	46.92	3	13.3	26.25	53.03
1052712e	-6.87	7.4	55.64	3	13.3	26.25	53.03
1052712f	-5.90	9.52	71.58	2	13.3	26.25	53.03
1052712g	-8.26	12.22	91.88	4	13.3	26.25	53.03
1052712h	-8.95	12.91	97.07	4	13.3	26.25	53.03
Sección 3							
1052713a	73.38	0.32	2.34	1	13.7	39.78	53.03
1052713b	44.70	2.43	17.74	1	13.7	39.78	53.03
1052713c	26.05	4.35	31.75	3	13.7	39.78	53.03
1052713d	12.54	6.36	46.42	2	13.7	39.78	53.03
1052713e	3.32	7.88	57.52	3	13.7	39.78	53.03
1052713f	-0.92	9.87	72.04	4	13.7	39.78	53.03
1052713g	-5.48	11.94	87.15	4	13.7	39.78	53.03
1052713h	-5.28	12.95	94.53	4	13.7	39.78	53.03
Sección 4							
1052714a	60.20	0.44	3.21	1	14	53.03	53.03
1052714b	50.37	2.49	18.18	2	14	53.03	53.03
1052714c	35.68	4.36	31.82	2	14	53.03	53.03
1052714d	20.12	6.49	47.37	1	14	53.03	53.03
1052714e	10.62	8.03	58.61	3	14	53.03	53.03
1052714g	6.08	9.76	71.24	2	14	53.03	53.03
1052714h	-0.79	11.71	85.47	2	14	53.03	53.03
1052714i	-2.88	12.79	93.36	2	14	53.03	53.03
Sección 5							
1052715a	28.00	0.28	1.89	1	14.8	108.02	53.03
1052715b	35.25	2.64	17.84	1	14.8	108.02	53.03
1052715c	35.38	4.74	32.03	3	14.8	108.02	53.03
1052715d	31.36	7.1	47.97	3	14.8	108.02	53.03
1052715e	27.21	8.83	59.66	2	14.8	108.02	53.03
1052715f	22.75	10.4	70.27	3	14.8	108.02	53.03
1052715g	18.51	12.49	84.39	2	14.8	108.02	53.03
1052715h	14.70	14.41	97.36	2	14.8	108.02	53.03

Datos Filtrados del resalto sumergido a 18.1 cm del aliviadero con Q =10.5 (m3/h)							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al Límite	% calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
1052720a	-6,67	0,31	1,83	3	16,9	0	53,03
1052720b	2,56	2,73	16,15	2	16,9	0	53,03
1052720c	9,47	4,98	29,47	4	16,9	0	53,03
1052720d	25,63	7,44	44,02	3	16,9	0	53,03
1052720e	59,56	9,28	54,91	4	16,9	0	53,03
1052720f	64,49	10,78	63,79	4	16,9	0	53,03
1052720g	18,80	12,51	74,02	1	16,9	0	53,03
1052720h	-9,96	14,2	84,02	4	16,9	0	53,03
1052720i	-15,50	15,81	93,55	4	16,9	0	53,03
Sección 1							
1052721a	43,74	0,44	2,57	3	17,1	13,25	53,03
1052721b	41,96	2,69	15,73	2	17,1	13,25	53,03
1052721c	41,65	5,23	30,58	3	17,1	13,25	53,03
1052721d	26,15	7,95	46,49	3	17,1	13,25	53,03
1052721e	11,97	9,8	57,31	3	17,1	13,25	53,03
1052721f	2,18	11,23	65,67	3	17,1	13,25	53,03
1052721g	-6,02	12,78	74,74	4	17,1	13,25	53,03
1052721h	-10,64	14,86	86,90	4	17,1	13,25	53,03
1052721i	-12,35	16,23	94,91	3	17,1	13,25	53,03
Sección 2							
1052722a	59,87	0,61	3,51	1	17,4	26,25	53,03
1052722b	44,24	2,66	15,29	2	17,4	26,25	53,03
1052722c	32,73	5,02	28,85	2	17,4	26,25	53,03
1052722d	23,82	7,22	41,49	2	17,4	26,25	53,03
1052722e	13,63	9,16	52,64	2	17,4	26,25	53,03
1052722f	6,63	11,48	65,98	2	17,4	26,25	53,03
1052722g	1,17	13,59	78,10	2	17,4	26,25	53,03
1052722h	-0,75	15,32	88,05	4	17,4	26,25	53,03
1052722i	-1,94	16,98	97,59	4	17,4	26,25	53,03
Sección 3							
1052723a	54,23	0,56	3,16	1	17,7	39,78	53,03
1052723b	36,61	3,04	17,18	2	17,7	39,78	53,03
1052723c	26,32	5,11	28,87	2	17,7	39,78	53,03
1052723d	18,49	6,82	38,53	3	17,7	39,78	53,03
1052723e	11,30	9,38	52,99	2	17,7	39,78	53,03
1052723f	8,44	11,76	66,44	2	17,7	39,78	53,03
1052723g	7,91	13,61	76,89	3	17,7	39,78	53,03
1052723h	7,79	15,14	85,54	1	17,7	39,78	53,03
1052723i	6,13	16,81	94,97	1	17,7	39,78	53,03
Sección 4							
1052724a	44,13	0,37	2,07	1	17,9	53,03	53,03
1052724b	34,46	2,97	16,59	4	17,9	53,03	53,03
1052724c	22,55	5,38	30,06	1	17,9	53,03	53,03
1052724d	16,63	7,84	43,80	3	17,9	53,03	53,03
1052724e	14,28	10,21	57,04	3	17,9	53,03	53,03
1052724f	13,75	12	67,04	2	17,9	53,03	53,03
1052724g	11,94	13,96	77,99	3	17,9	53,03	53,03
1052724h	11,64	16,34	91,28	1	17,9	53,03	53,03
1052724i	10,79	17,17	95,92	1	17,9	53,03	53,03
Sección 5							
1052725a	22,52	0,3	1,66	2	18,1	108,02	53,03
1052725b	25,17	3,08	17,02	1	18,1	108,02	53,03
1052725c	24,11	5,34	29,50	1	18,1	108,02	53,03
1052725d	22,08	8,05	44,48	1	18,1	108,02	53,03
1052725e	20,45	10,32	57,02	1	18,1	108,02	53,03
1052725f	19,24	12,51	69,12	1	18,1	108,02	53,03
1052725g	16,37	13,76	76,02	1	18,1	108,02	53,03
1052725h	16,17	15,85	87,57	1	18,1	108,02	53,03
1052725i	15,30	17,71	97,85	1	18,1	108,02	53,03

Datos filtrados de resalto libre al pie de aliviadero con Q=12 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 2							
1203002a	81.67	0.38	0.04	1	9.21	28.32	56.65
1203002b	61.55	1.19	0.13	1	9.21	28.32	56.65
1203002c	52.07	1.87	0.20	1	9.21	28.32	56.65
1203002d	39.48	2.56	0.28	1	9.21	28.32	56.65
1203002e	3.27	5.26	0.57	3	9.21	28.32	56.65
Sección 3							
1203003a	56.82	0.44	0.04	1	10.60	42.49	56.65
1203003b	54.60	1.18	0.11	0	10.60	42.49	56.65
1203003c	63.15	1.95	0.18	1	10.60	42.49	56.65
1203003d	55.24	2.77	0.26	1	10.60	42.49	56.65
1203003e	46.15	3.92	0.37	1	10.60	42.49	56.65
1203003f	45.73	4.66	0.44	1	10.60	42.49	56.65
1203003g	17.40	8.64	0.82	3	10.60	42.49	56.65
Sección 4							
1203004a	52.52	0.46	0.04	1	11.57	56.65	56.65
1203004b	57.73	1.04	0.09	1	11.57	56.65	56.65
1203004c	60.56	1.90	0.16	1	11.57	56.65	56.65
1203004d	59.93	2.80	0.24	1	11.57	56.65	56.65
1203004e	52.50	3.46	0.30	0	11.57	56.65	56.65
1203004f	53.60	4.62	0.40	0	11.57	56.65	56.65
1203004g	47.85	5.41	0.47	1	11.57	56.65	56.65
1203004h	23.24	8.52	0.74	1	11.57	56.65	56.65
1203004i	23.84	9.34	0.81	4	11.57	56.65	56.65
Sección 5							
1203005a	36.56	0.39	0.03	1	11.75	109.82	56.65
1203005b	38.40	1.19	0.10	0	11.75	109.82	56.65
1203005c	39.51	2.07	0.18	1	11.75	109.82	56.65
1203005d	40.57	2.73	0.23	0	11.75	109.82	56.65
1203005e	40.46	3.55	0.30	2	11.75	109.82	56.65
1203005f	41.78	4.52	0.38	0	11.75	109.82	56.65
1203005g	41.95	5.40	0.46	0	11.75	109.82	56.65
1203005h	41.33	6.17	0.53	2	11.75	109.82	56.65
1203005i	34.87	8.72	0.74	1	11.75	109.82	56.65
1203005j	34.33	10.19	0.87	1	11.75	109.82	56.65

Datos filtrados de resalto sumergido a 14.8 cm de aliviadero con Q=12 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
1203010a	86.15	1.3	0.13	1	10.28	0	56.65
1203010b	108.51	2.61	0.25	4	10.28	0	56.65
1203010c	-14.08	6.87	0.67	4	10.28	0	56.65
1203010d	-15.88	9.35	0.91	4	10.28	0	56.65
Sección 1							
1203011a	123.617	0.43	0.04	1	11.05	14.16	56.65
1203011b	102.671	2.07	0.19	1	11.05	14.16	56.65
1203011c	70.051	3.25	0.29	2	11.05	14.16	56.65
1203011d	23.033	4.72	0.43	1	11.05	14.16	56.65
1203011e	-15.015	7.18	0.65	4	11.05	14.16	56.65
1203011f	-20.511	9.72	0.88	4	11.05	14.16	56.65
Sección 2							
1203012a	106.67	0.33	0.03	1	12.04	28.32	56.65
1203012b	79.26	1.87	0.16	0	12.04	28.32	56.65
1203012c	34.63	3.5	0.29	1	12.04	28.32	56.65
1203012d	13.57	5.05	0.42	1	12.04	28.32	56.65
1203012e	-0.85	6.8	0.56	1	12.04	28.32	56.65
1203012f	-2.29	7.71	0.64	1	12.04	28.32	56.65
1203012g	-6.52	11.26	0.94	4	12.04	28.32	56.65
Sección 3							
1203013a	83.92	0.47	0.04	1	12.99	42.83	56.65
1203013b	63.19		0.00	1	12.99	42.83	56.65
1203013c	39.71	3.66	0.28	1	12.99	42.83	56.65
1203013d	26.37	5.2	0.40	1	12.99	42.83	56.65
1203013e	12.47	6.76	0.52	1	12.99	42.83	56.65
1203013f	4.87	7.86	0.61	1	12.99	42.83	56.65
1203013g	1.16	9.46	0.73	4	12.99	42.83	56.65
1203013h	-7.01	12.32	0.95	4	12.99	42.83	56.65
Sección 4							
1203014a	69.51	0.52	0.04	1	13.34	56.65	56.65
1203014b	70.29	1.3	0.10	1	13.34	56.65	56.65
1203014c	48.18	3.35	0.25	1	13.34	56.65	56.65
1203014d	39.68	4.84	0.36	1	13.34	56.65	56.65
1203014e	23.97	6.68	0.50	1	13.34	56.65	56.65
1203014f	14.79	7.82	0.59	1	13.34	56.65	56.65
1203014g	12.34	8.24	0.62	0	13.34	56.65	56.65
1203014h	-1.59	12.29	0.92	4	13.34	56.65	56.65
Sección 5							
1203015a	34.86	0.43	0.03	1	14.8	109.83	56.65
1203015b	39.10	1.97	0.13	1	14.8	109.83	56.65
1203015c	41.64	3.88	0.26	1	14.8	109.83	56.65
1203015d	40.55	5.46	0.37	3	14.8	109.83	56.65
1203015e	26.24	10.75	0.73	3	14.8	109.83	56.65
1203015f	16.38	13.95	0.94	1	14.8	109.83	56.65

Datos filtrados de resalto sumergido a 18.2 cm de aliviadero con Q=12 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
1203020a	-7.76	0.29	0.02	0	16.5	0	56.65
1203020b	-5.02	1.25	0.08	3	16.5	0	56.65
1203020c	11.00	4.53	0.27	1	16.5	0	56.65
1203020d	12.68	6.88	0.42	0	16.5	0	56.65
1203020e	54.80	8.43	0.51	3	16.5	0	56.65
1203020f	69.08	8.87	0.54	1	16.5	0	56.65
1203020g	71.83	10.76	0.65	1	16.5	0	56.65
1203020h	62.64	11.86	0.72	2	16.5	0	56.65
1203020i	-2.60	14.43	0.87	3	16.5	0	56.65
Sección 1							
1203021a	36.75	0.36	0.02	0	17	14.16	56.65
1203021b	53.65	2.55	0.15	1	17	14.16	56.65
1203021c	48.16	5.42	0.32	1	17	14.16	56.65
1203021d	33.99	7.07	0.42	1	17	14.16	56.65
1203021e	26.30	8.56	0.50	0	17	14.16	56.65
1203021f	16.39	8.99	0.53	3	17	14.16	56.65
1203021g	0.05	10.93	0.64	1	17	14.16	56.65
1203021h	2.41	11.64	0.68	4	17	14.16	56.65
1203021i	-12.06	15.49	0.91	3	17	14.16	56.65
Sección 2							
1203022a	64.97	0.39	0.02	1	17.2	28.32	56.65
1203022b	45.20	3.07	0.18	0	17.2	28.32	56.65
1203022c	35.12	4.96	0.29	1	17.2	28.32	56.65
1203022d	19.78	7.75	0.45	1	17.2	28.32	56.65
1203022e	16.03	10.32	0.60	4	17.2	28.32	56.65
1203022f	3.30	12.64	0.73	4	17.2	28.32	56.65
1203022g	-2.68	16.5	0.96	3	17.2	28.32	56.65
Sección 3							
1203023a	56.06	0.36	0.02	2	17.5	42.83	56.65
1203023b	44.03	2.36	0.13	3	17.5	42.83	56.65
1203023c	32.14	4.71	0.27	1	17.5	42.83	56.65
1203023d	21.21	7.59	0.43	3	17.5	42.83	56.65
1203023e	15.52	9.71	0.55	1	17.5	42.83	56.65
1203023f	13.89	9.9	0.57	1	17.5	42.83	56.65
1203023g	11.46	11.58	0.66	1	17.5	42.83	56.65
1203023h	9.35	11.85	0.68	4	17.5	42.83	56.65
1203023i	2.92	16.07	0.92	4	17.5	42.83	56.65
Sección 4							
1203024a	47.56	0.49	0.03	1	18	56.65	56.65
1203024b	38.61	2.93	0.16	2	18	56.65	56.65
1203024c	26.80	5.29	0.29	3	18	56.65	56.65
1203024d	18.98	7.77	0.43	3	18	56.65	56.65
1203024e	16.30	10.07	0.56	1	18	56.65	56.65
1203024f	14.67	11.54	0.64	2	18	56.65	56.65
1203024g	9.55	14.69	0.82	2	18	56.65	56.65
1203024h	6.99	17.59	0.98	2	18	56.65	56.65
Sección 5							
1203025a	25.38	0.42	0.02	0	18.5	109.83	56.65
1203025b	29.12	2.94	0.16	1	18.5	109.83	56.65
1203025c	29.36	5.13	0.28	1	18.5	109.83	56.65
1203025d	26.55	7.64	0.41	1	18.5	109.83	56.65
1203025e	22.99	9.17	0.50	1	18.5	109.83	56.65
1203025f	19.05	12.23	0.66	0	18.5	109.83	56.65
1203025g	16.91	15.95	0.86	1	18.5	109.83	56.65
1203025h	14.31	17.48	0.94	2	18.5	109.83	56.65

Datos filtrados de resalto sumergido a 19 cm de aliviadero Q=12 m3/h							
Archivo	Ux(cm/s)	Distancia al limite (cm)	% Calado	Filtros	Calado superior (cm)	x	Lj
Sección 0							
1203030a	-3.48	0.33	0.02	1	17	0	56.65
1203030b	5.45	2.06	0.12	4	17	0	56.65
1203030c	1.20	4.28	0.25	4	17	0	56.65
1203030d	20.08	7.17	0.42	2	17	0	56.65
1203030e	40.84	7.92	0.47	4	17	0	56.65
1203030f	50.09	8.91	0.52	1	17	0	56.65
1203030g	72.82	10.42	0.61	4	17	0	56.65
1203030h	76.12	10.67	0.63	4	17	0	56.65
1203030i	29.84	13.9	0.82	4	17	0	56.65
1203030j	-4.26	15.54	0.91	2	17	0	56.65
Sección 1							
1203031a	47.87	0.46	0.03	1	17.5	14.16	56.65
1203031b	53.19	2.31	0.13	1	17.5	14.16	56.65
1203031c	51.64	5.95	0.34	2	17.5	14.16	56.65
1203031d	35.28	7.7	0.44	1	17.5	14.16	56.65
1203031e	17.47	9.4	0.54	1	17.5	14.16	56.65
1203031f	14.91	10.63	0.61	1	17.5	14.16	56.65
1203031g	-0.95	11.5	0.66	4	17.5	14.16	56.65
1203031h	-6.45	13.58	0.78	4	17.5	14.16	56.65
1203031i	-12.25	15.69	0.90	4	17.5	14.16	56.65
Sección 2							
1203032a	61.50	0.37	0.02	1	18	28.32	56.65
1203032b	48.68	2.66	0.15	1	18	28.32	56.65
1203032c	35.90	5.17	0.29	1	18	28.32	56.65
1203032d	31.01	7.14	0.40	3	18	28.32	56.65
1203032e	17.93	9.47	0.53	4	18	28.32	56.65
1203032f	14.26	9.84	0.55	3	18	28.32	56.65
1203032g	8.95	11.52	0.64	4	18	28.32	56.65
1203032h	3.39	11.79	0.66	3	18	28.32	56.65
1203032i	-3.35	14.7	0.82	4	18	28.32	56.65
1203032j	-7.85	16.98	0.94	1	18	28.32	56.65
Sección 3							
1203033a	59.01	0.32	0.02	1	18.2	42.83	56.65
1203033b	48.93	2.41	0.13	3	18.2	42.83	56.65
1203033c	38.82	4.6	0.25	3	18.2	42.83	56.65
1203033d	30.22	6.89	0.38	4	18.2	42.83	56.65
1203033e	18.15	8.49	0.47	1	18.2	42.83	56.65
1203033f	18.15	9.52	0.52	3	18.2	42.83	56.65
1203033g	11.64	11.7	0.64	4	18.2	42.83	56.65
1203033h	6.17	12.17	0.67	4	18.2	42.83	56.65
1203033i	2.87	14.06	0.77	1	18.2	42.83	56.65
1203033j	-2.49	17.66	0.97	0	18.2	42.83	56.65
Sección 4							
1203034a	52.12	0.35	0.02	1	18.5	56.65	56.65
1203034b	45.85	2.49	0.13	3	18.5	56.65	56.65
1203034c	37.85	4.52	0.24	1	18.5	56.65	56.65
1203034d	30.34	6.91	0.37	0	18.5	56.65	56.65
1203034e	22.78	8.62	0.47	2	18.5	56.65	56.65
1203034f	21.50	9.59	0.52	4	18.5	56.65	56.65
1203034g	11.27	12.25	0.66	0	18.5	56.65	56.65
1203034h	4.81	15.04	0.81	3	18.5	56.65	56.65
1203034i	2.23	17.95	0.97	3	18.5	56.65	56.65
Sección 5							
1203035a	31.70	0.37	0.02	1	19	109.83	56.65
1203035b	36.31	2.79	0.15	1	19	109.83	56.65
1203035c	34.14	5.24	0.28	1	19	109.83	56.65
1203035d	30.41	7.59	0.40	1	19	109.83	56.65
1203035e	22.88	9.63	0.51	1	19	109.83	56.65
1203035f	19.11	12.71	0.67	1	19	109.83	56.65
1203035g	16.73	13.23	0.70	1	19	109.83	56.65
1203035h	12.99	15.99	0.84	1	19	109.83	56.65
1203035i	9.93	18.52	0.97	1	19	109.83	56.65

ANEXO III

CARACTERÍSTICAS DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS

En este anexo se muestran los resultados del muestreo limnimétrico para cada caudal y en función del desplazamiento.

y_1 = calado al inicio del resalto libre.

y_2 = calado al final del resalto libre.

$y_0 = y_1$ (para resaltos sumergidos)

y_4 = calado al final del resalto sumergido

b = ancho del canal (8 cm)

L_j = longitud del resalto hidráulico.

v_1 = velocidad al inicio del resalto libre.

$$V_1 = \frac{Q}{Y_1 * b}$$

v_2 = velocidad al final del resalto libre.

$$V_2 = \frac{Q}{Y_2 * b}$$

v_0 = velocidad al inicio del resalto sumergido.

$$V_0 = \frac{Q}{Y_0 * b}$$

v_4 = velocidad al final del resalto sumergido.

$$V_4 = \frac{Q}{Y_4 * b}$$

R_h = radio hidráulico.

$$R_h = \frac{Y_1 * b}{2Y_1 + b}$$

F_1 = Froude al inicio del resalto.

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

Re = numero de Reynolds al inicio del resalto. $Re = \frac{R_h * V_1}{\mu}$

H = nivel de la lámina aguas arriba del aliviadero

Resalto Libre al Pie del Aliviadero									
Q caudalimetro (m3/h)	Q Real	y1 (cm)	y2 (cm)	Lj (cm)	V1 (cm/s)	V2 (cm/s)	Re	F1	H (cm)
4,5	0,00149431	1,05	7,35	47,22	177,9	25,4	14795	5,54	19,5
5,5	0,00180986	1,40	8,2	46,43	161,6	27,6	16758	4,36	19,8
6,5	0,00212542	1,65	8,7	48,83	161,0	30,5	18809	4,00	20
7,5	0,00244097	1,95	8,9	49,47	156,5	34,3	20512	3,58	20,3
8,5	0,00275653	2,15	9,3	52,67	160,3	37,1	22411	3,49	20,6
9,5	0,00307208	2,40	10,3	54,21	160,0	37,3	24001	3,30	21
10,5	0,00338764	2,75	10,6	53,03	154,0	39,9	25094	2,96	21,3
12	0,00386097	3,05	11,6	56,65	158,2	41,6	27383	2,89	22,8

Resalto Sumergido al Pie del Aliviadero (Sumergencia 1)									
Q caudalimetro (m3/h)	Q Real (m3/s)	Y0 (cm)	y4 (cm)	Lj (cm)	V0 (cm/s)	V4 (cm/s)	Re	F1	H (cm)
4,5	0,00149431	1,05	13,75	47,22	177,9	13,6	14795	5,54	19,5
5,5	0,00180986	1,4	13,9	46,43	161,6	16,3	16758	4,36	19,8
8,5	0,00275653	2,15	14,1	52,67	160,3	24,4	22411	3,49	20,6
10,5	0,00338764	2,75	14	53,03	154,0	30,2	25094	2,96	21,3
12	0,00386097	3,05	13,3	56,65	158,2	36,3	27383	2,89	22,8

Resalto Sumergido al Pie del Aliviadero (Sumergencia 2)									
Q caudalimetro (m3/h)	Q Real (m3/s)	Y0 (cm)	y4 (cm)	Lj (cm)	V0 (cm/s)	V4 (cm/s)	Re	F1	H (cm)
4,5	0,00149431	1,05	15,2	47,22	177,9	12,3	14795	5,54	19,5
5,5	0,00180986	1,4	15	46,43	161,6	15,1	16758	4,36	19,8
8,5	0,00275653	2,15	16,5	52,67	160,3	20,9	22411	3,49	20,6
10,5	0,00338764	2,75	16,9	53,03	154,0	25,1	25094	2,96	21,3
12	0,00386097	3,05	16,5	56,65	158,2	29,2	27383	2,89	22,8

ANEXO IV

ESPECTROS DE TURBULENCIA DE LAS VELOCIDADES FLUCTUANTES Y DE LA CORTANTE

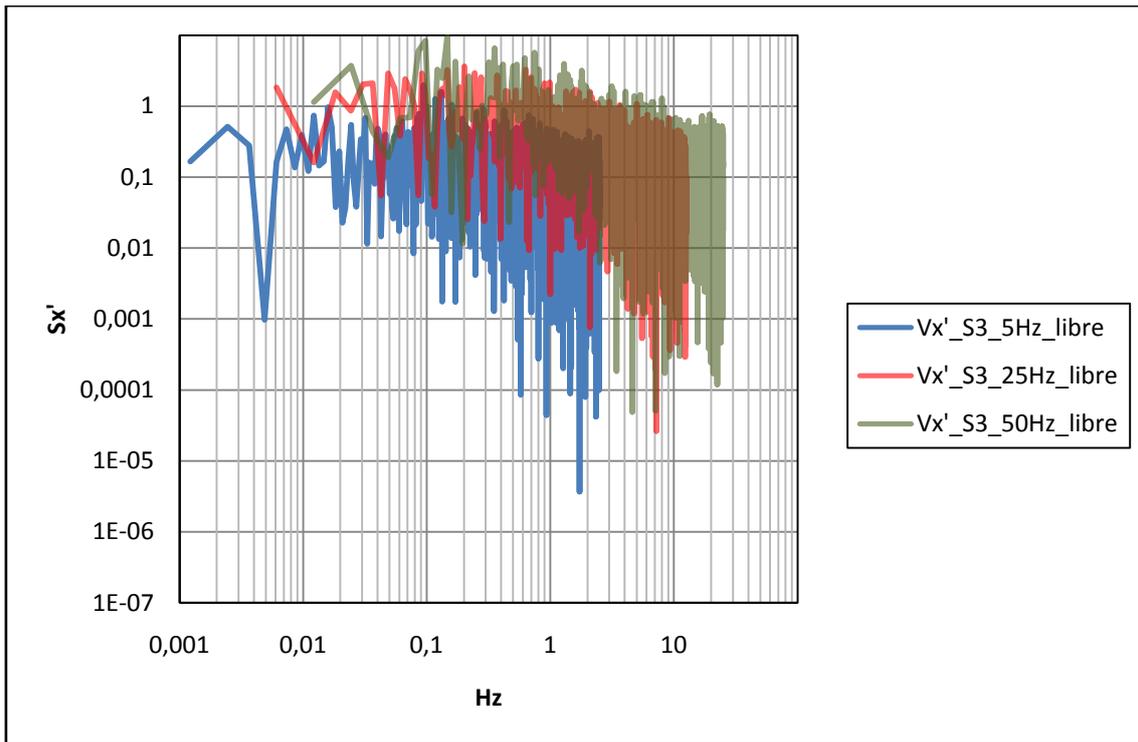


Figura A.IV.1. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 3 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

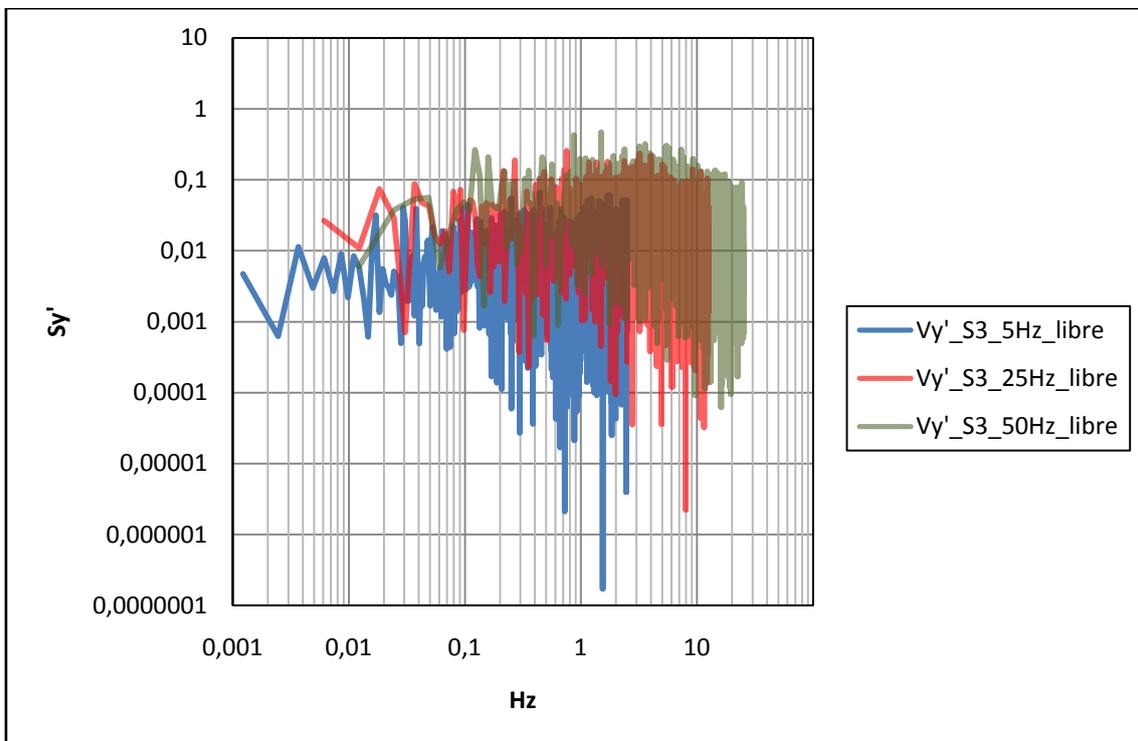


Figura A.IV.2. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 3 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

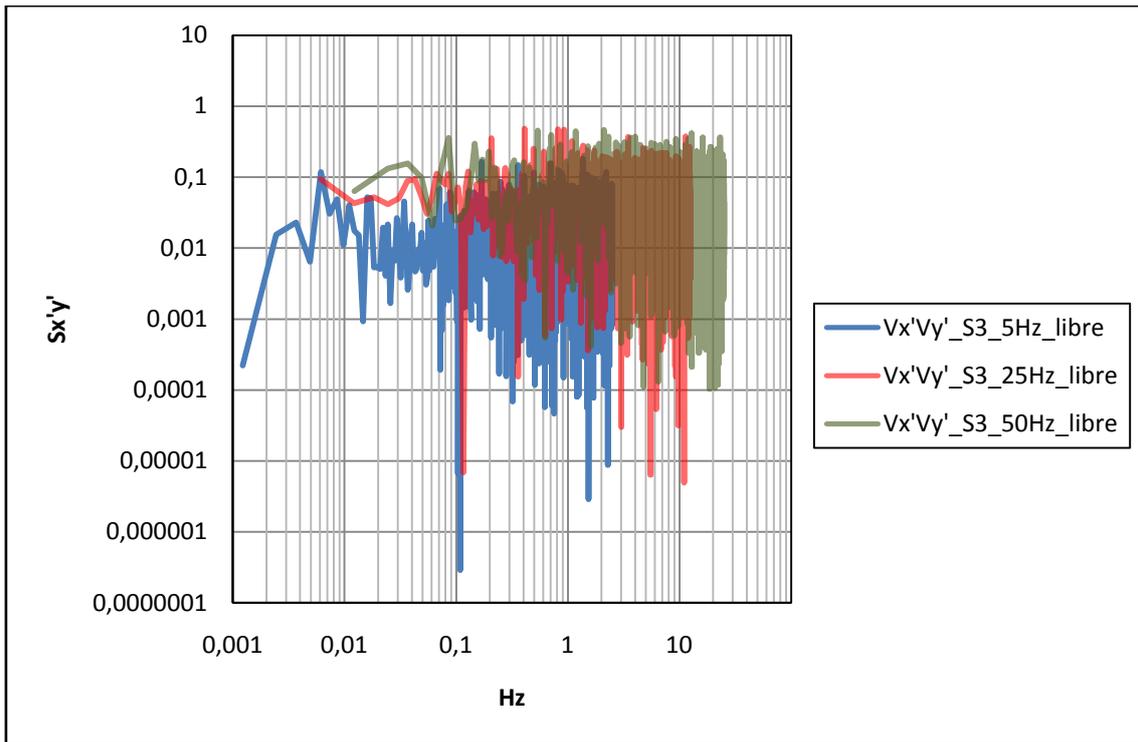


Figura A.IV.3. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 3 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

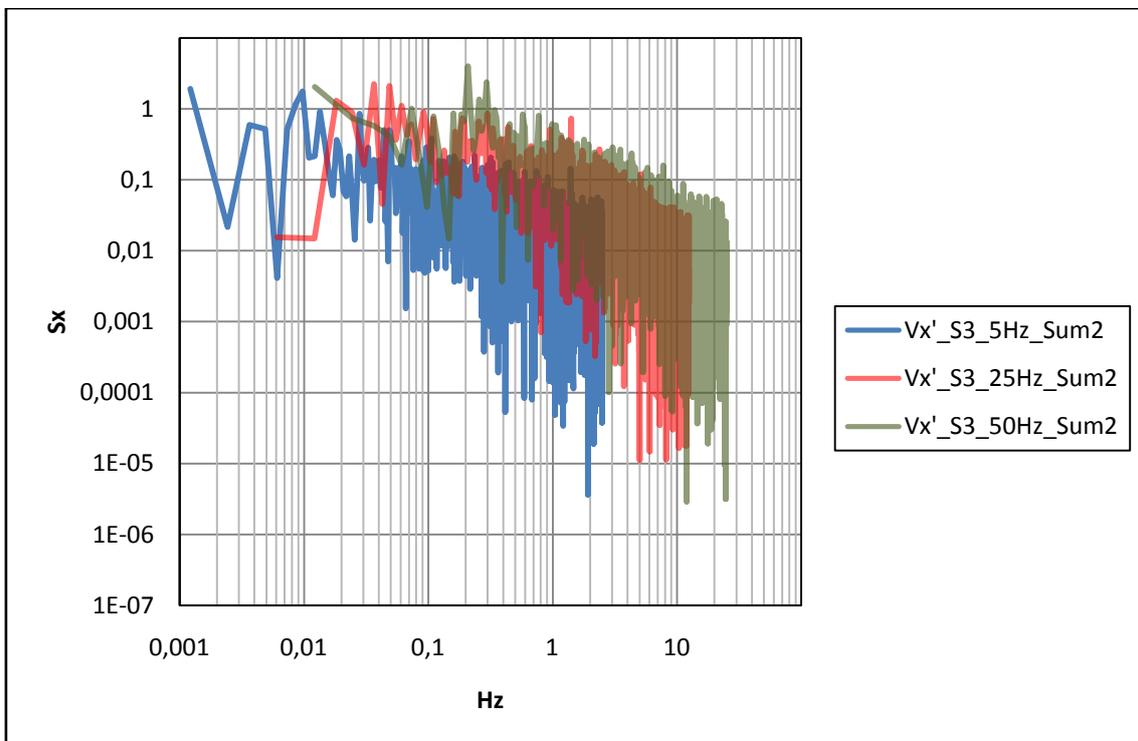


Figura A.IV.4. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 3 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

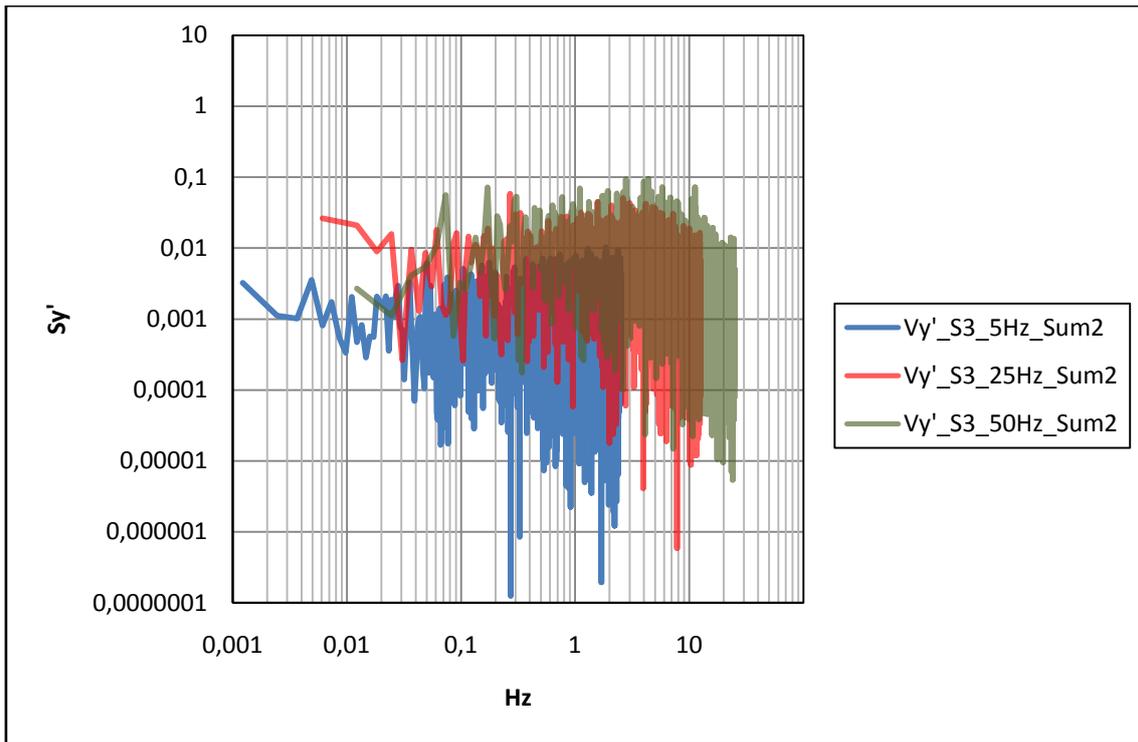


Figura A.IV.5. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 3 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

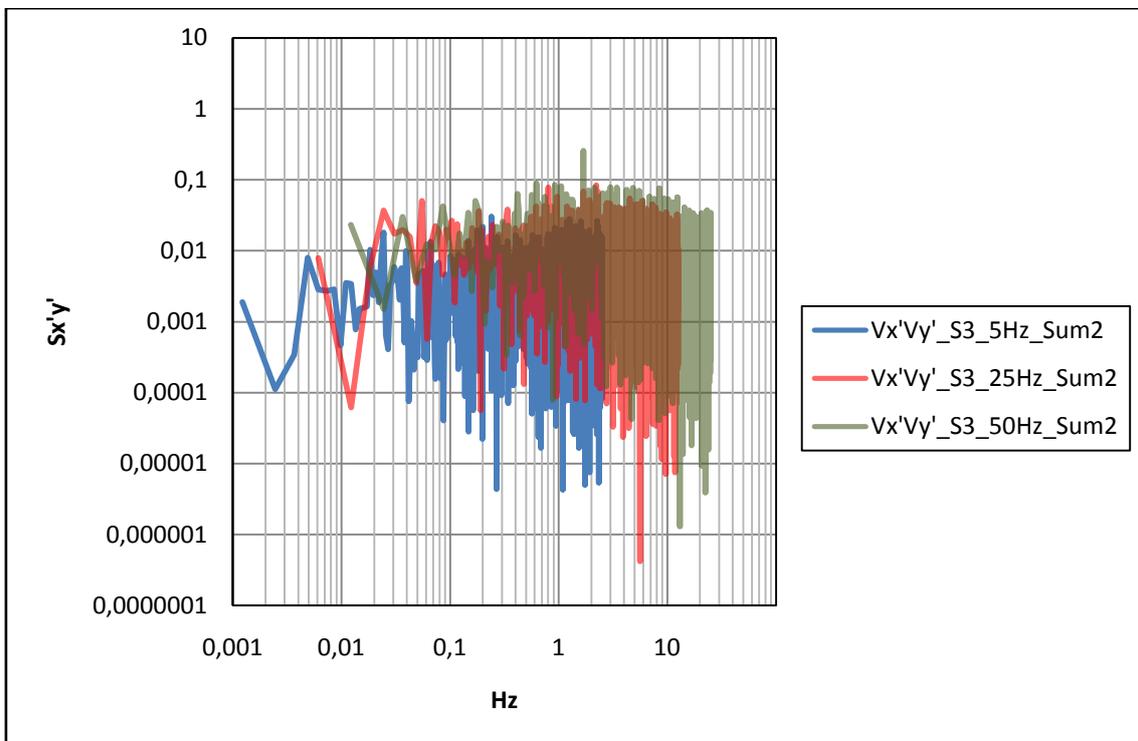


Figura A.IV.6. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 3 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

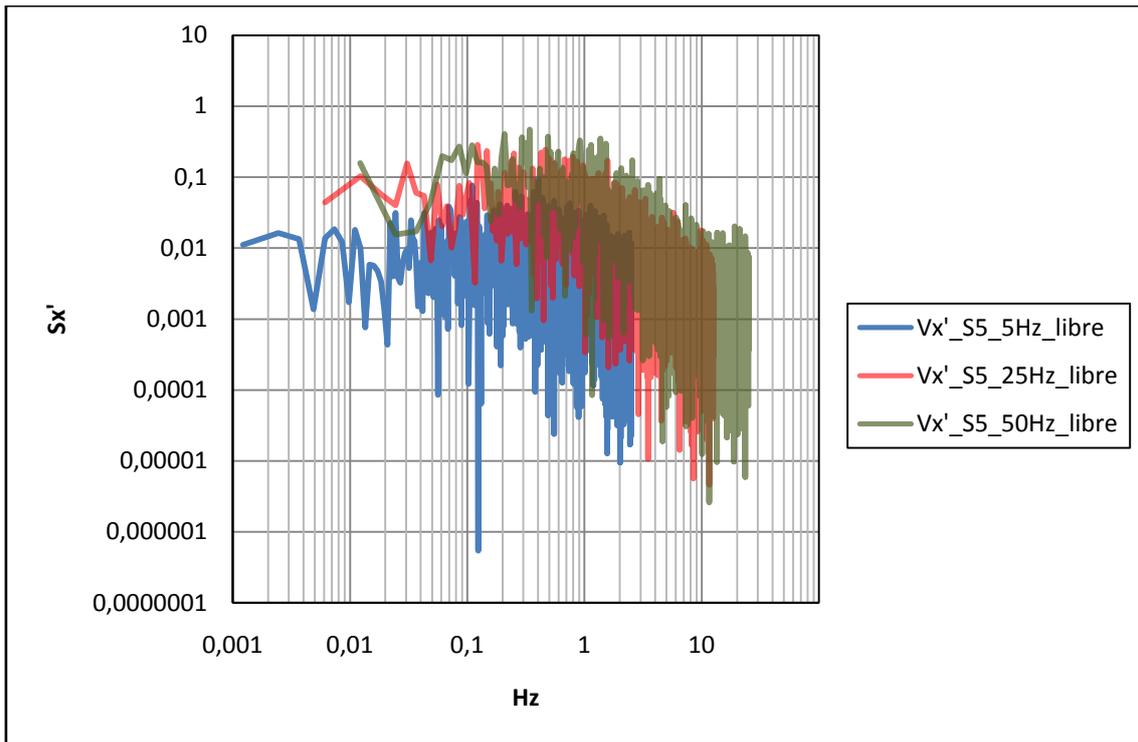


Figura A.IV.7. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

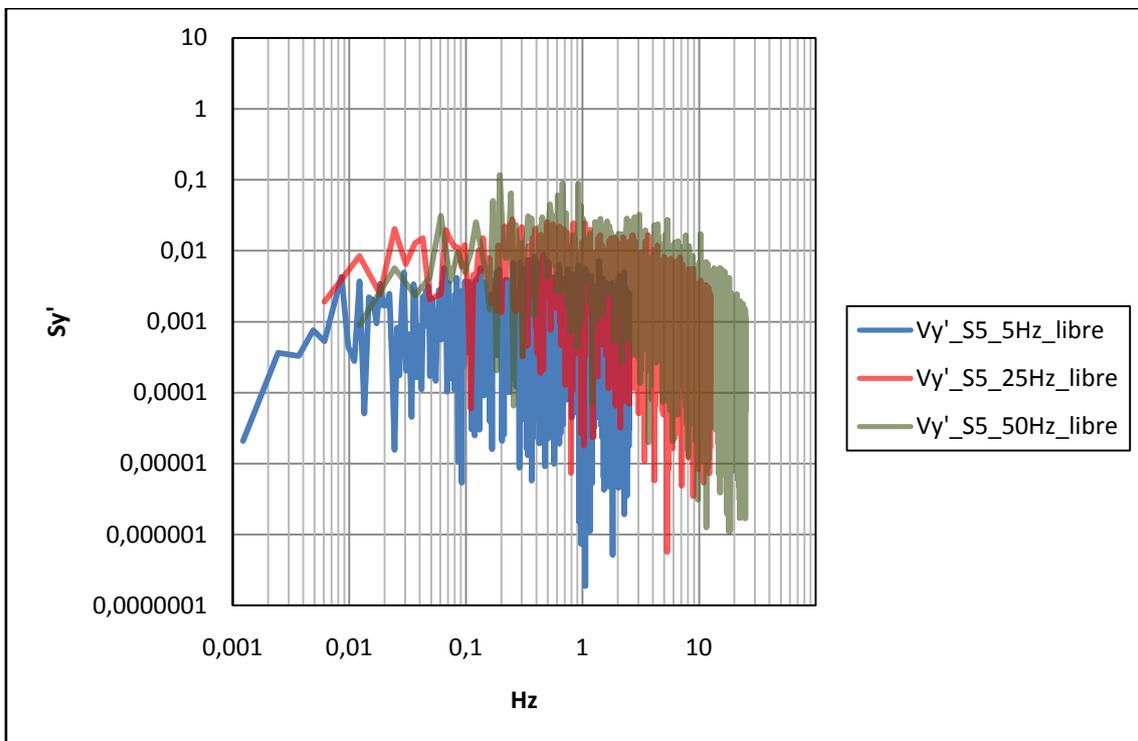


Figura A.IV.8. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

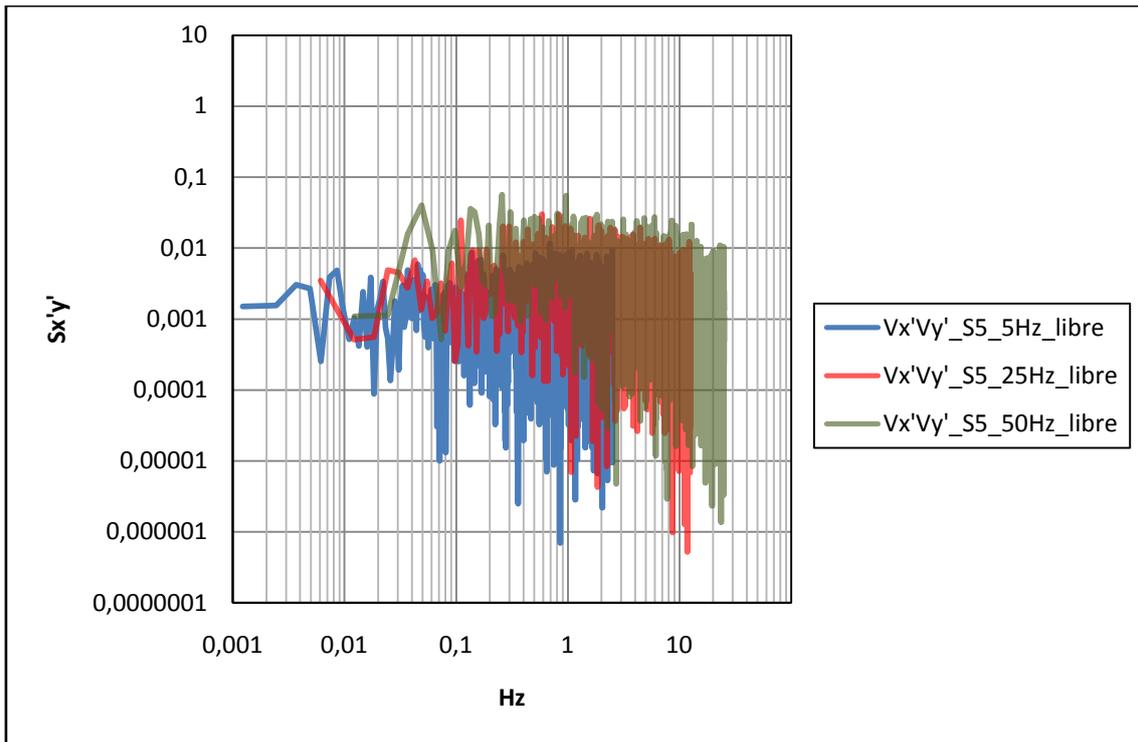


Figura A.IV.9. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 5 del resalto libre a 5, 25 y 50Hz.

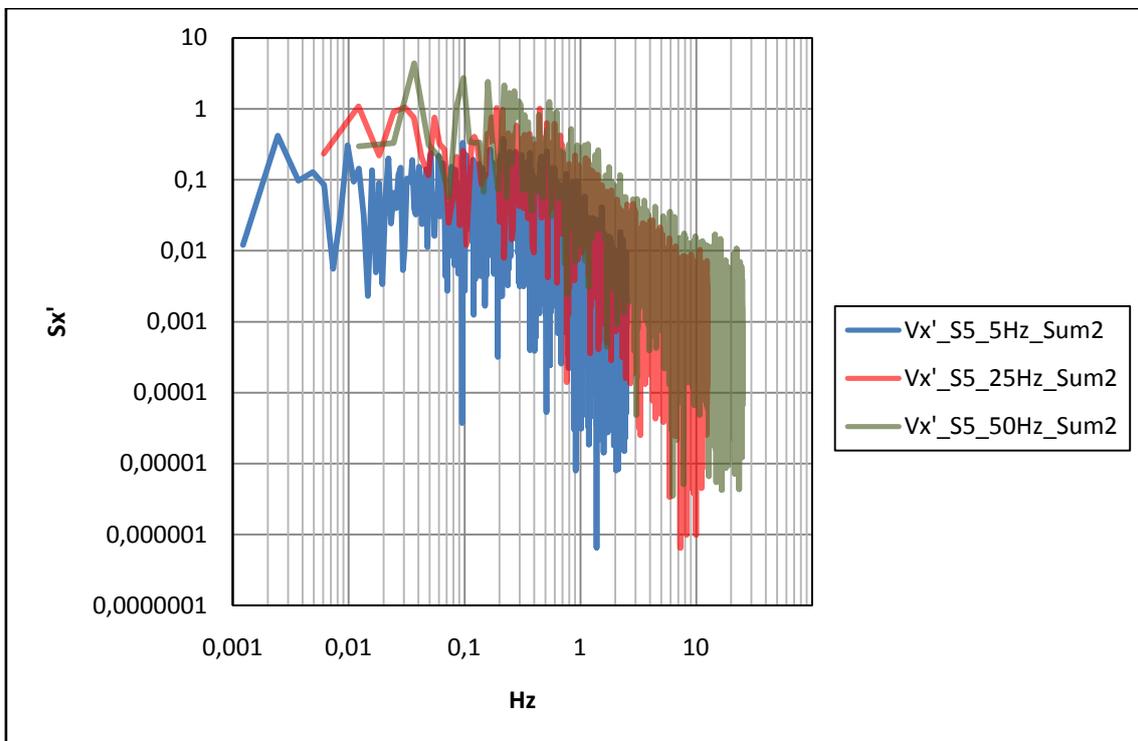


Figura A.IV.10. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

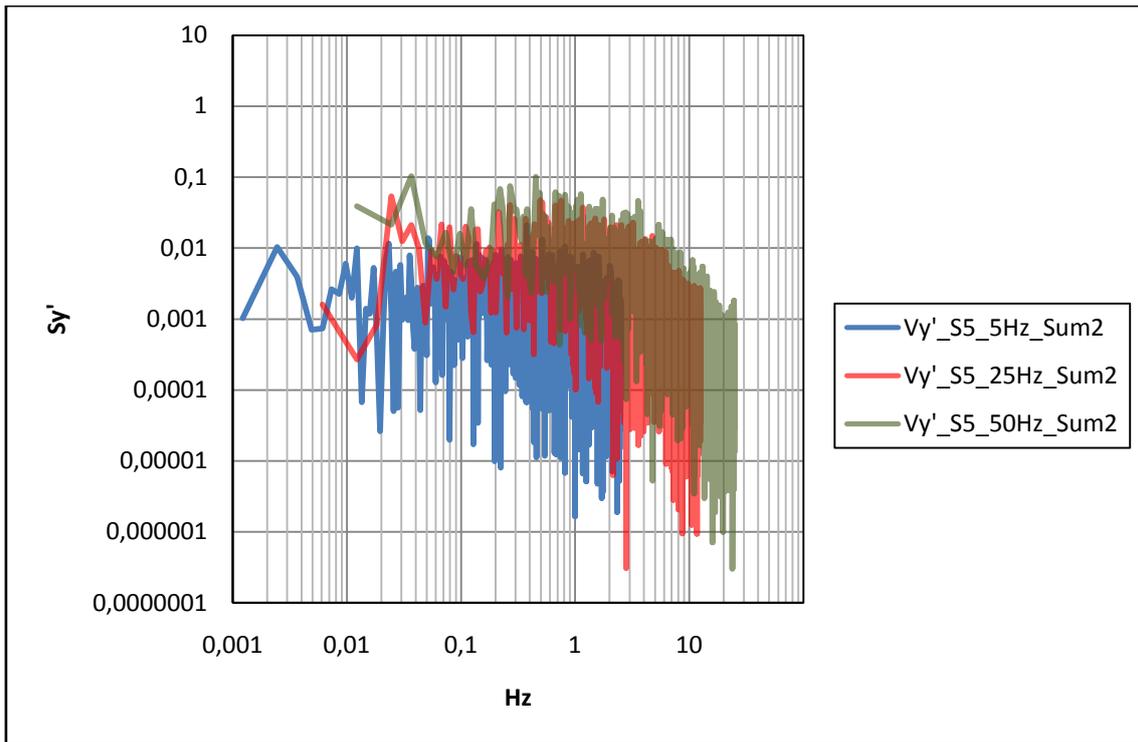


Figura A.IV.11. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

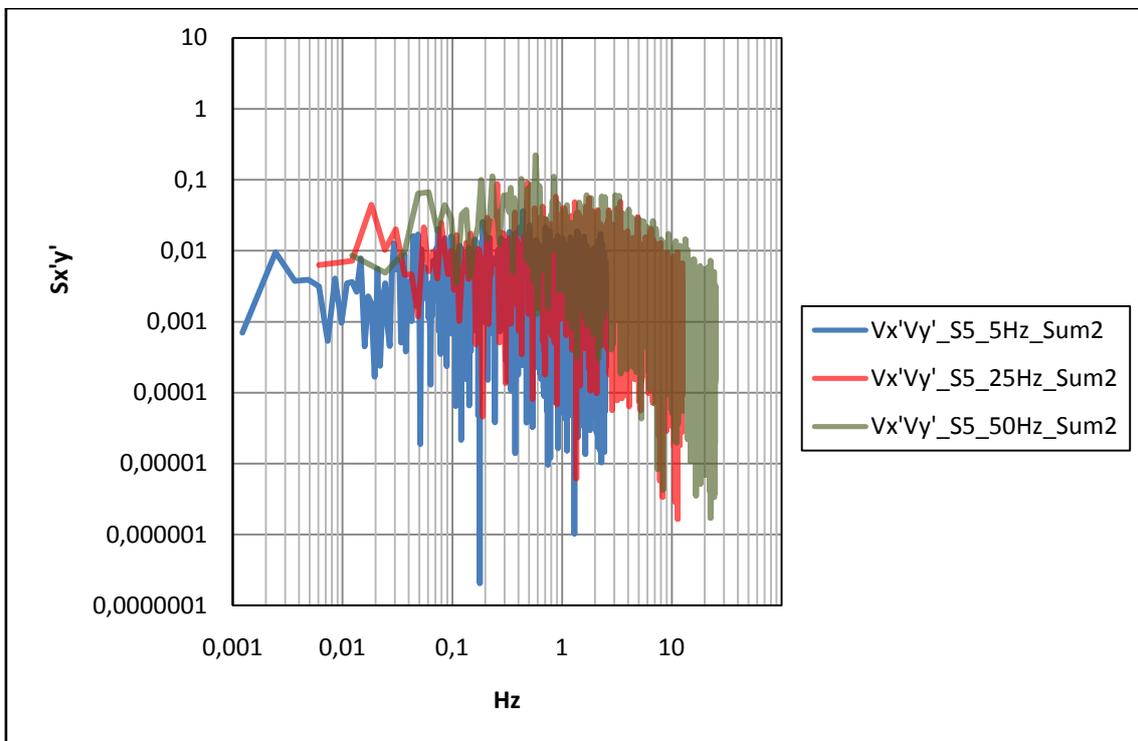


Figura A.IV.12. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la sección 5 del resalto sumergido a 5, 25 y 50Hz.

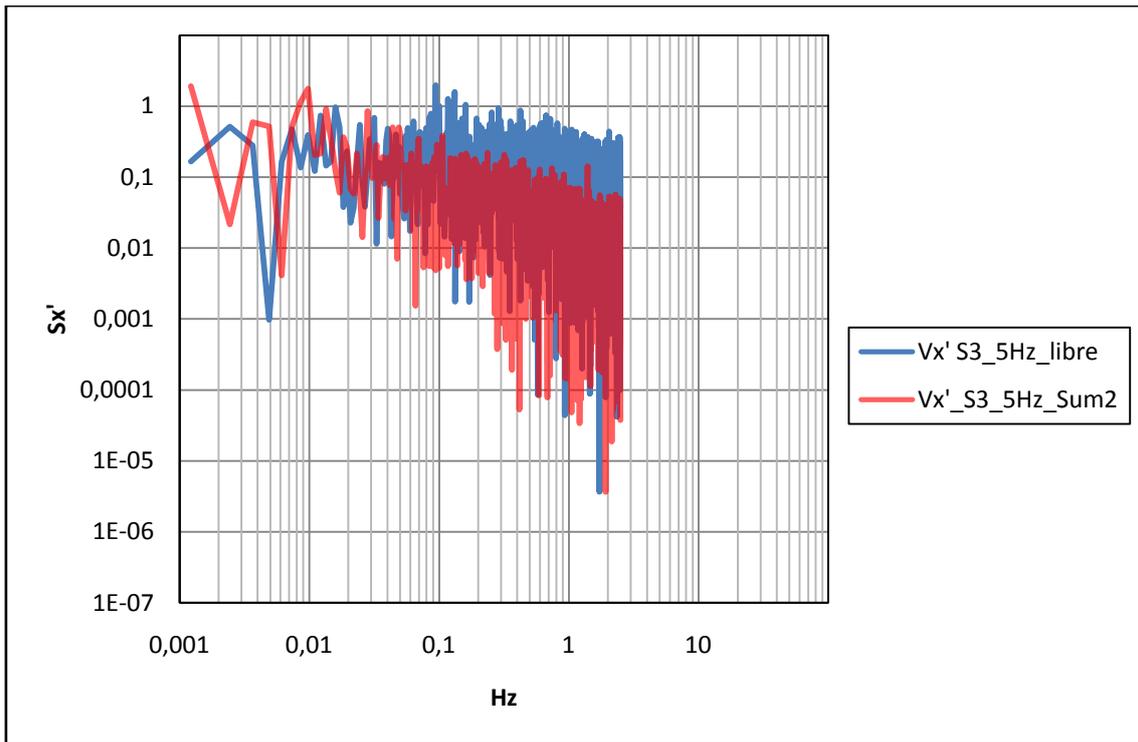


Figura A.IV.13. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 5Hz.

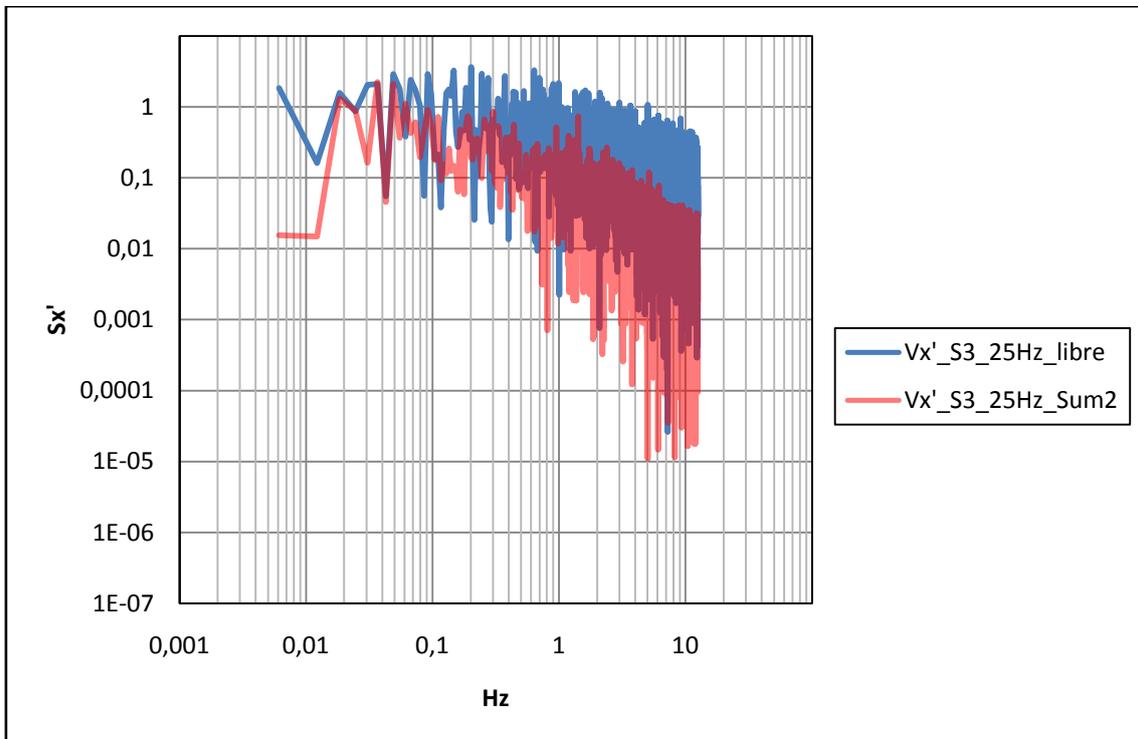


Figura A.IV.14. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 25Hz.

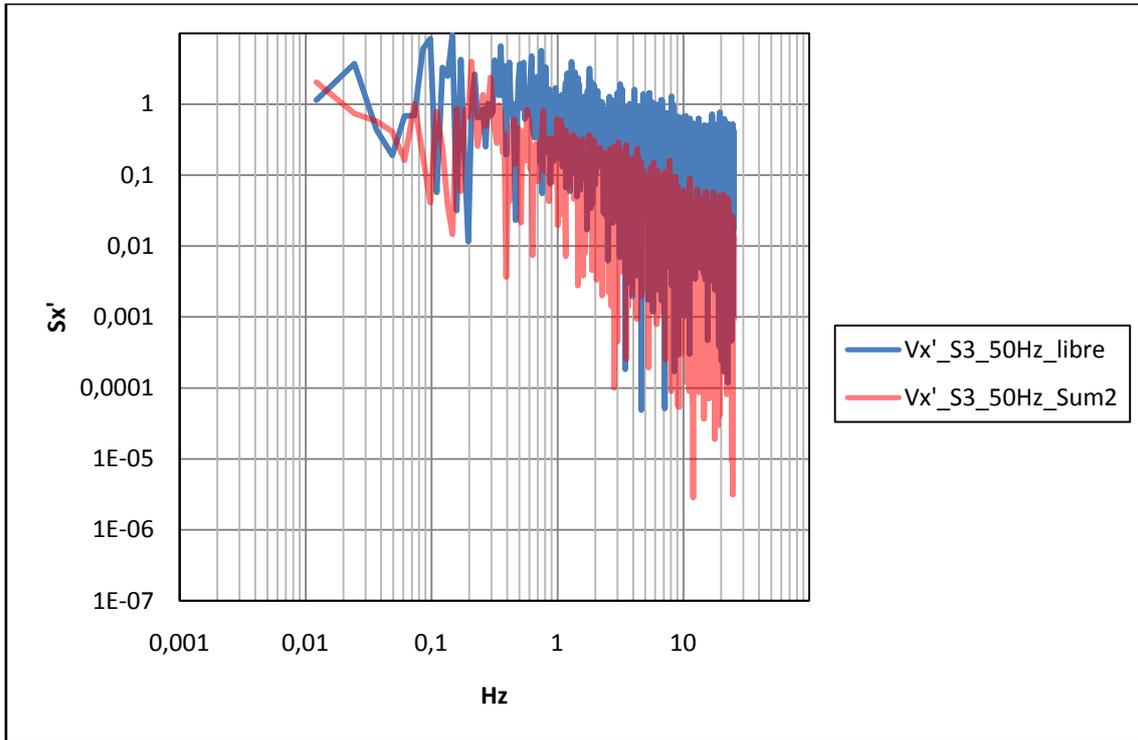


Figura A.IV.15. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

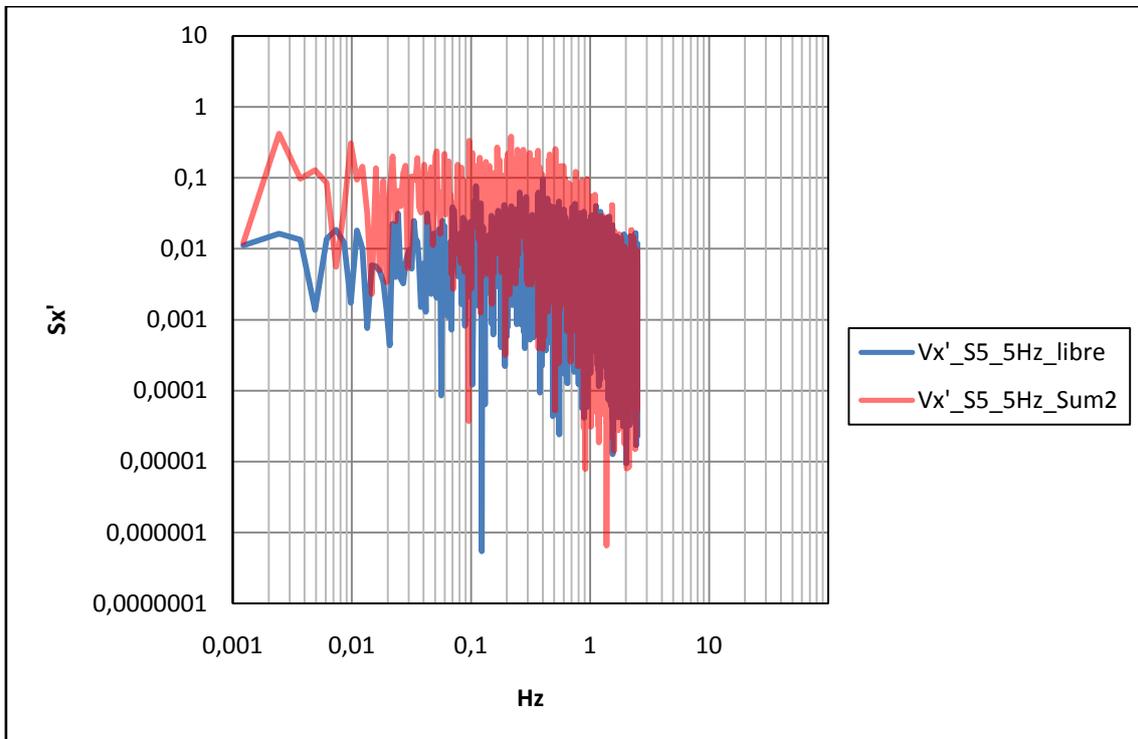


Figura A.IV.16. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 5Hz.

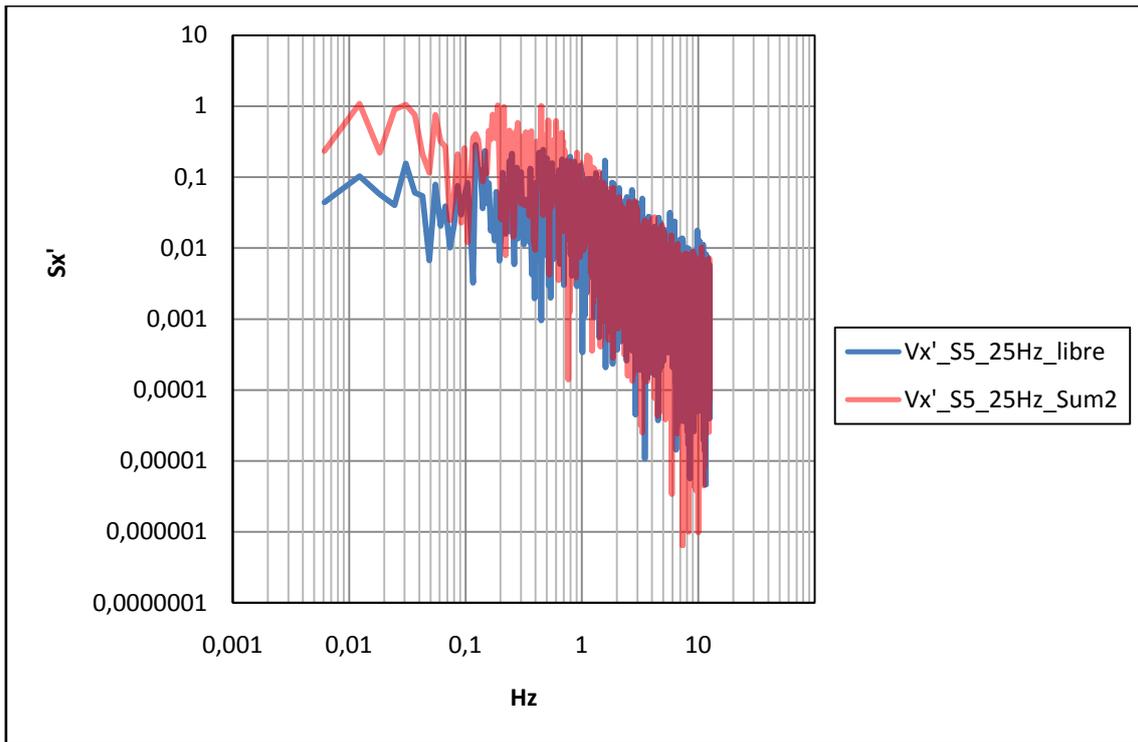


Figura A.IV.17. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 25Hz.

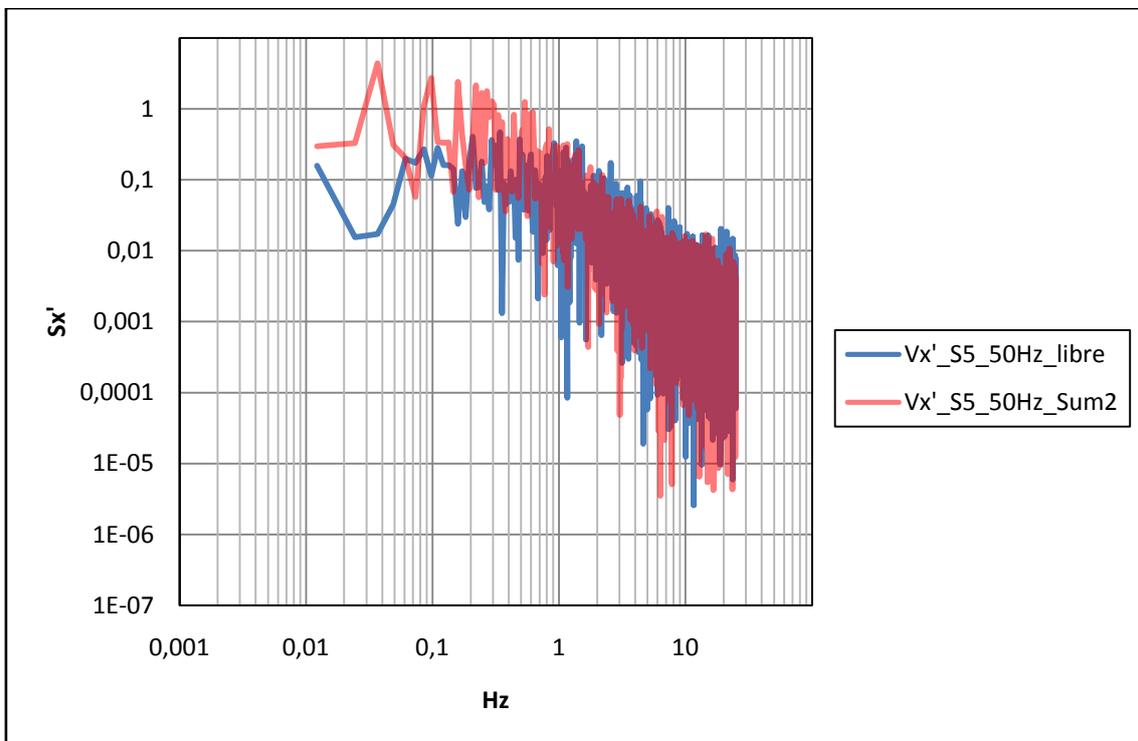


Figura A.IV.18. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

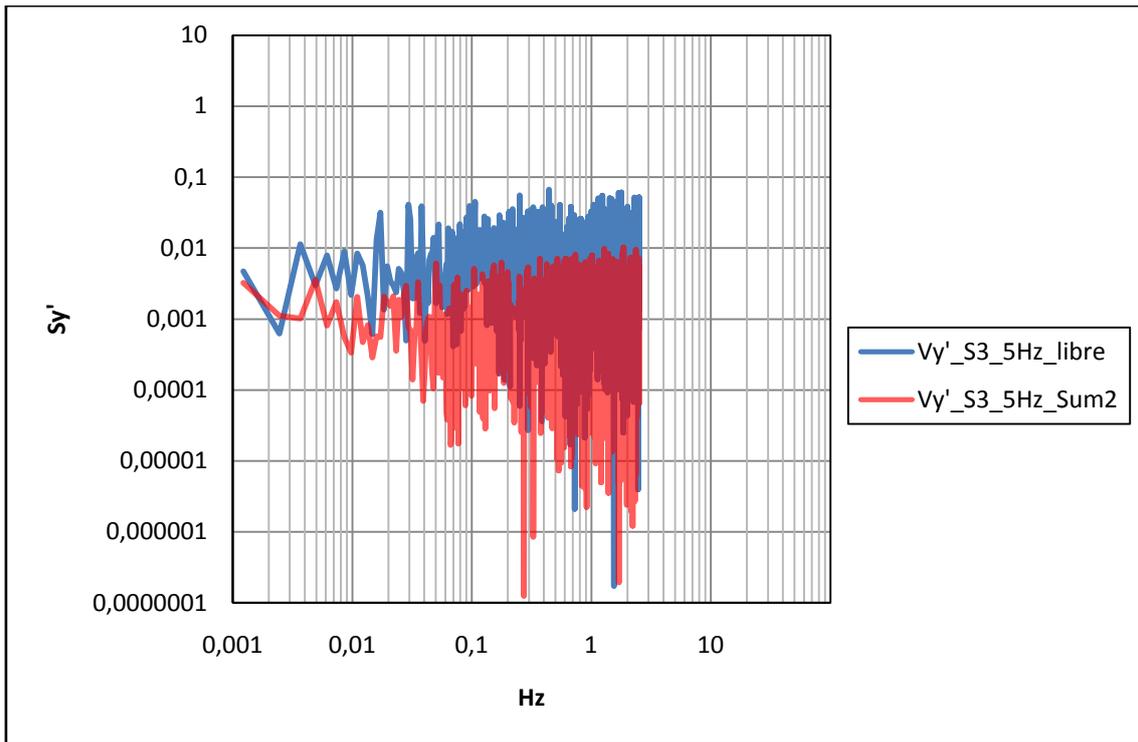


Figura A.IV.19. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 5Hz.

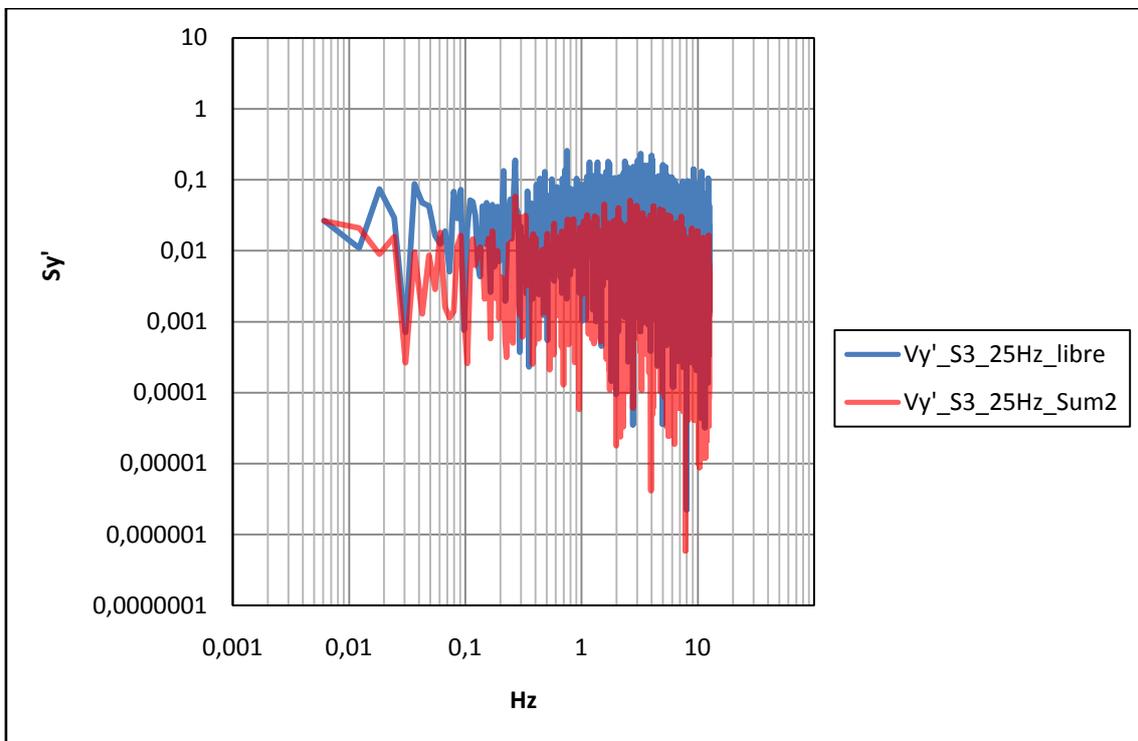


Figura A.IV.20. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 25Hz.

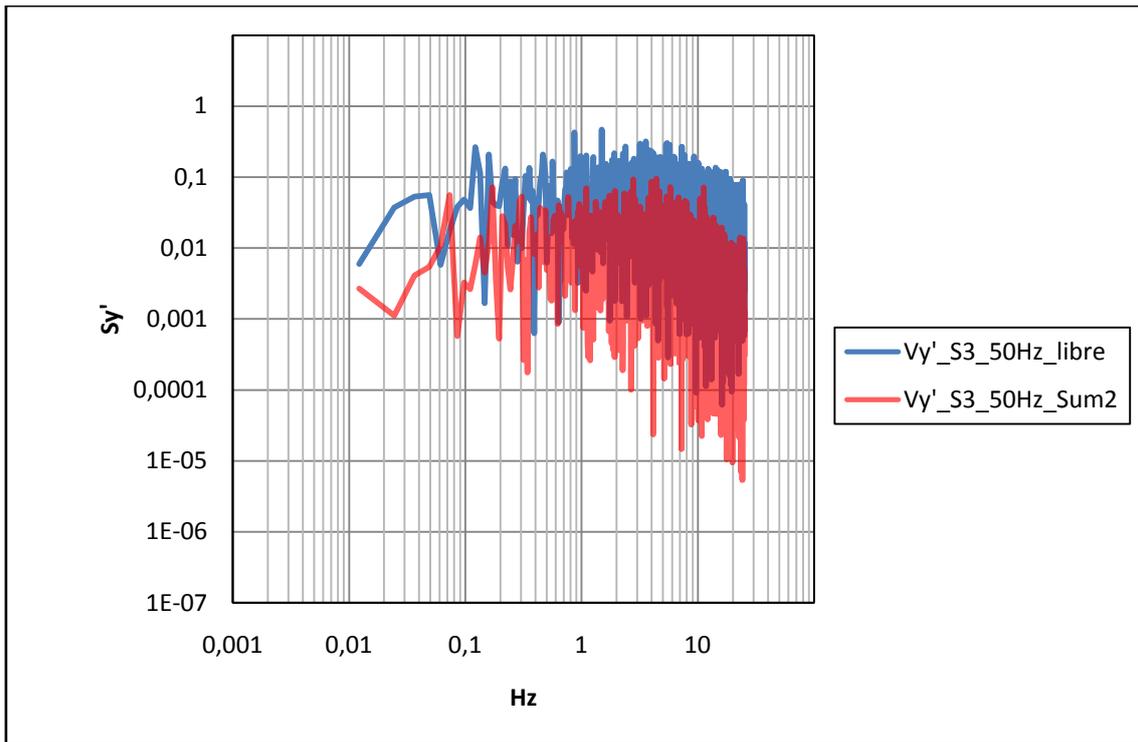


Figura A.IV.21. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

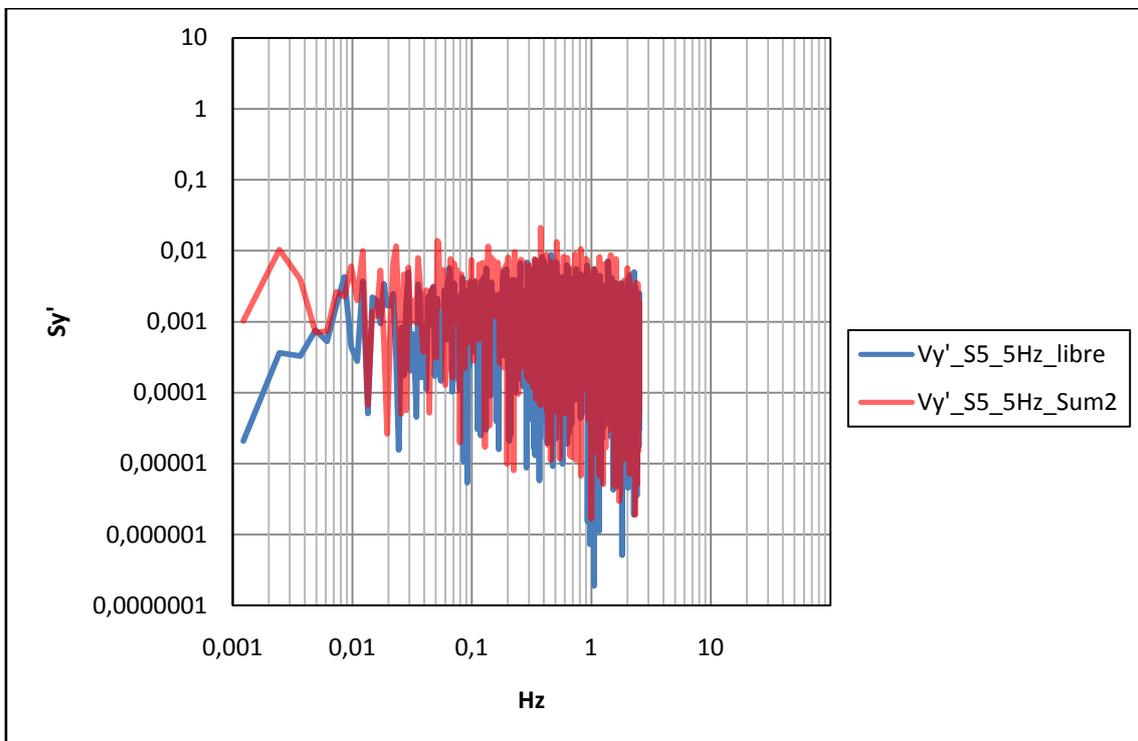


Figura A.IV.22. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 5Hz.

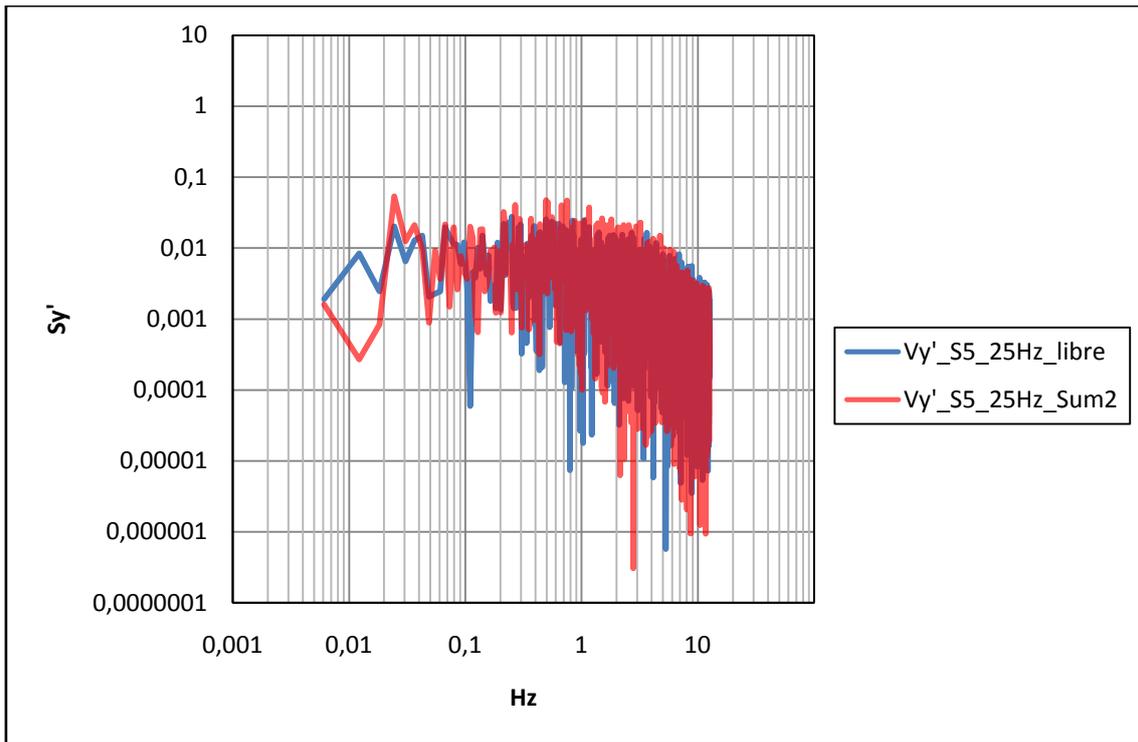


Figura A.IV.23. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 25Hz.

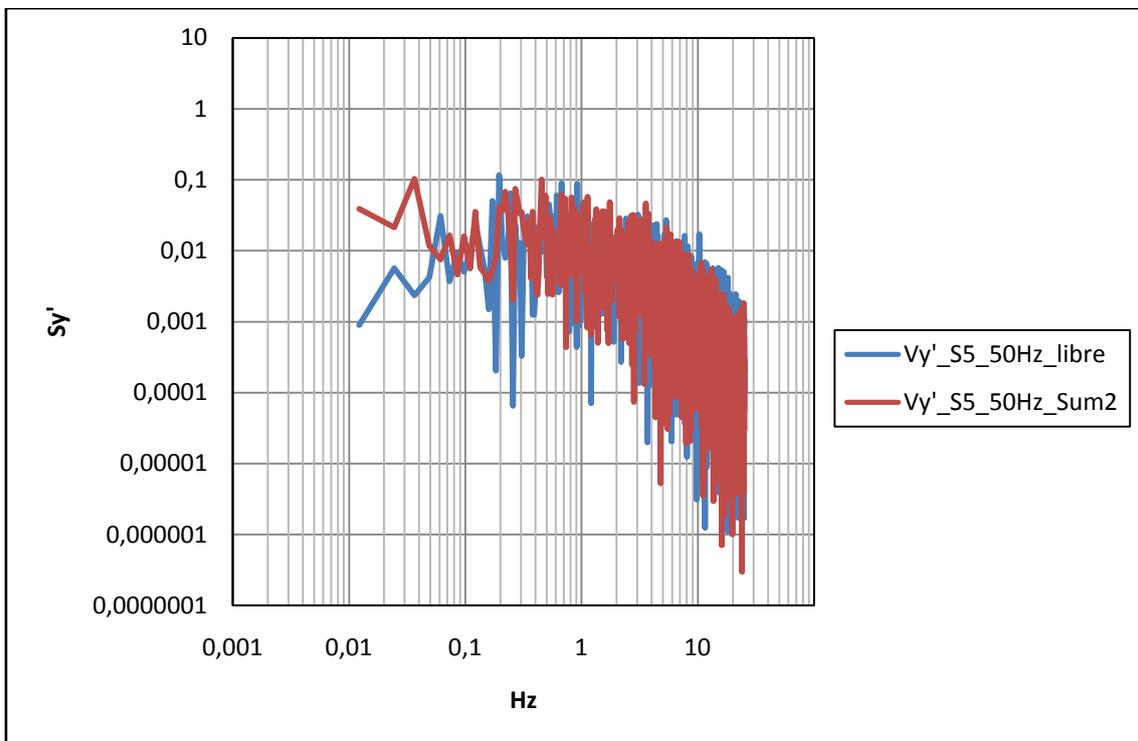


Figura A.IV.24. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

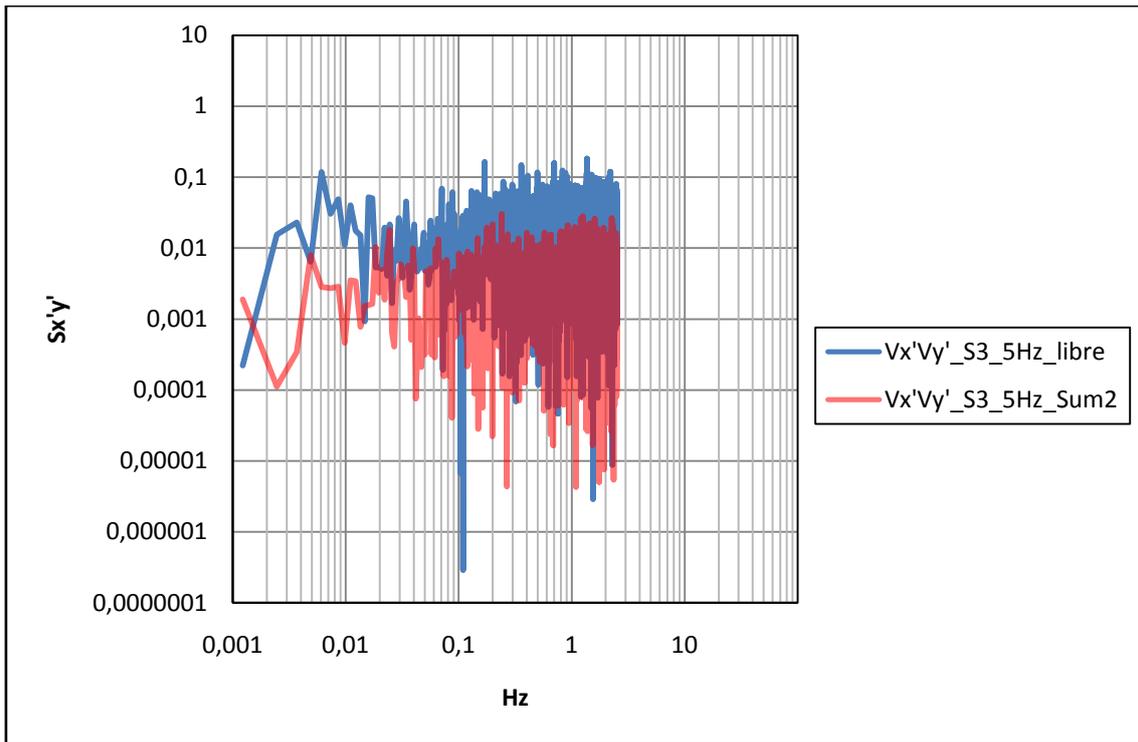


Figura A.IV.25. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_{x'}V_{y'}$ en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 5Hz.

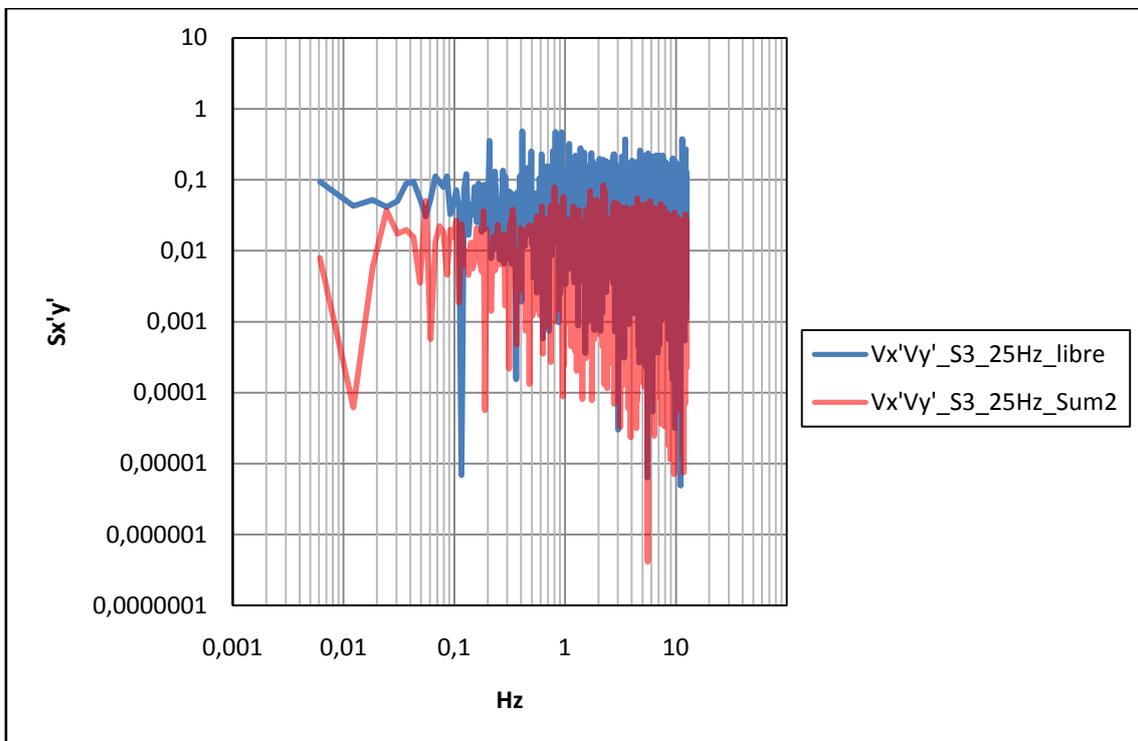


Figura A.IV.26. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_{x'}V_{y'}$ en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 25Hz.

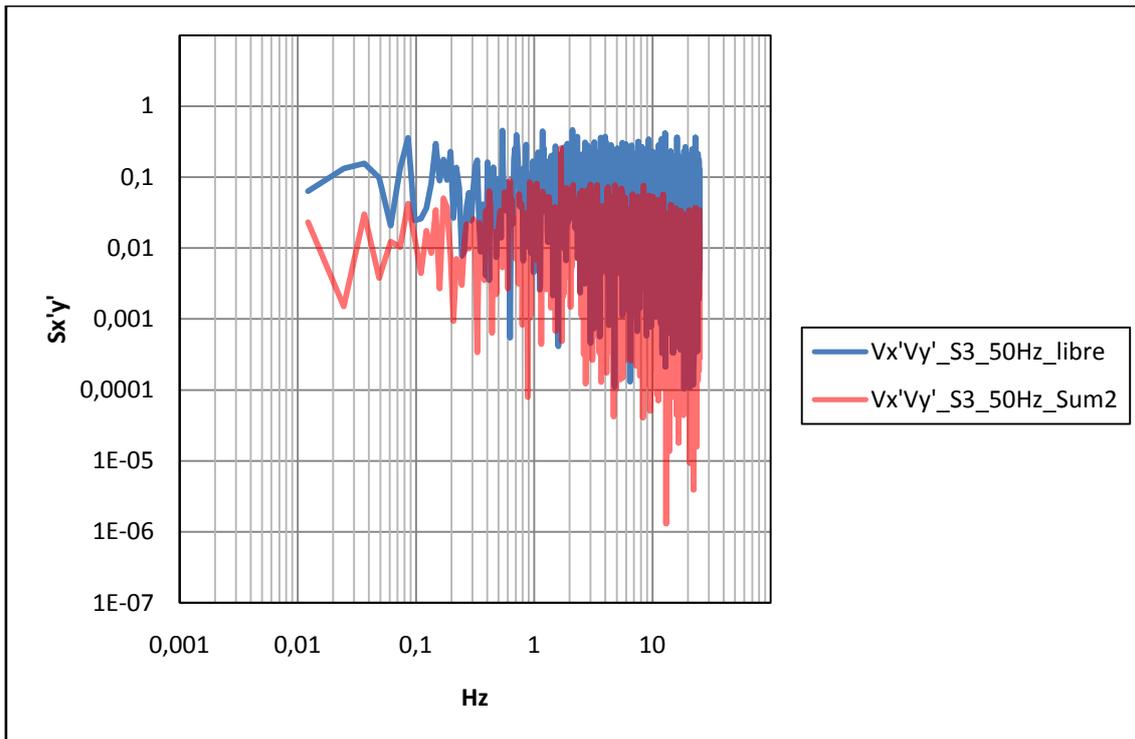


Figura A.IV.27. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_{x'}V_{y'}$ en la sección 3 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

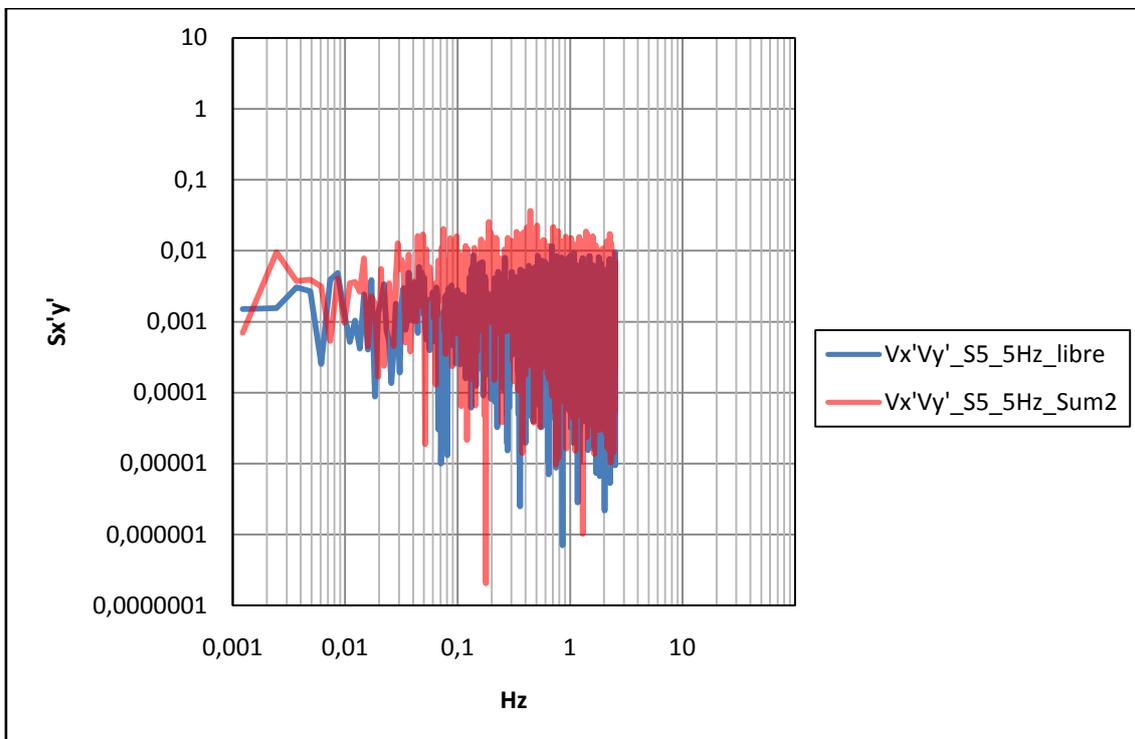


Figura A.IV.28. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_{x'}V_{y'}$ en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 5Hz.

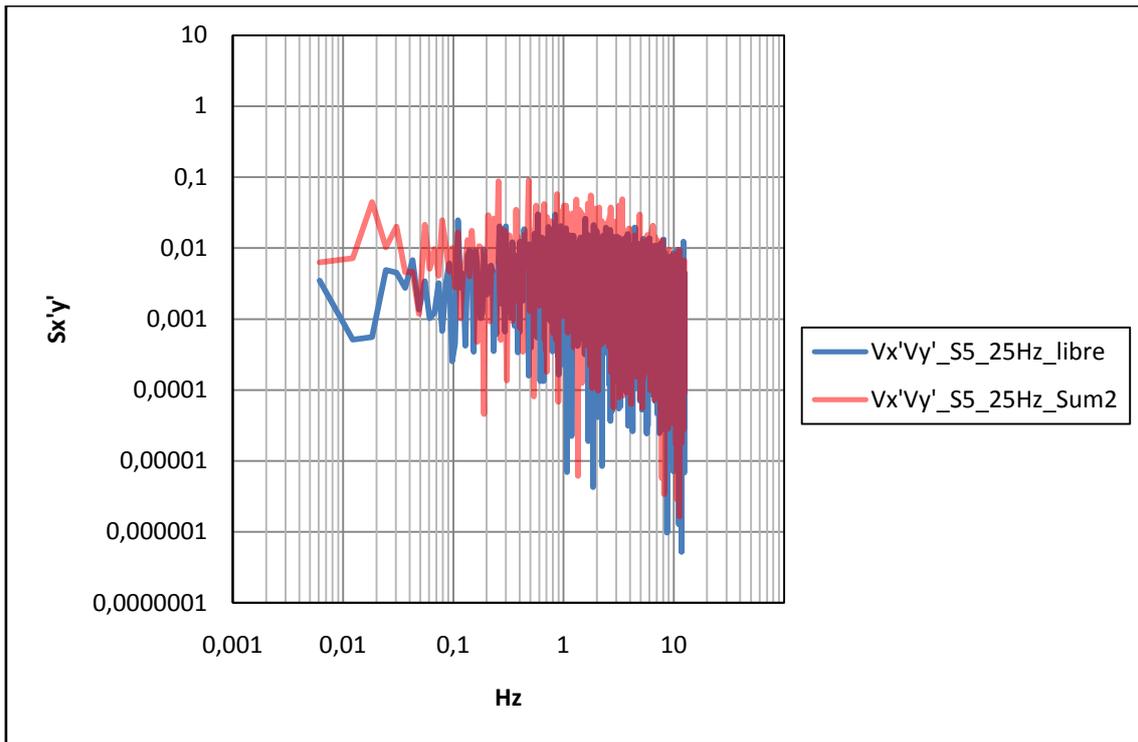


Figura A.IV.29. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_{x'}V_{y'}'$ en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 25Hz.

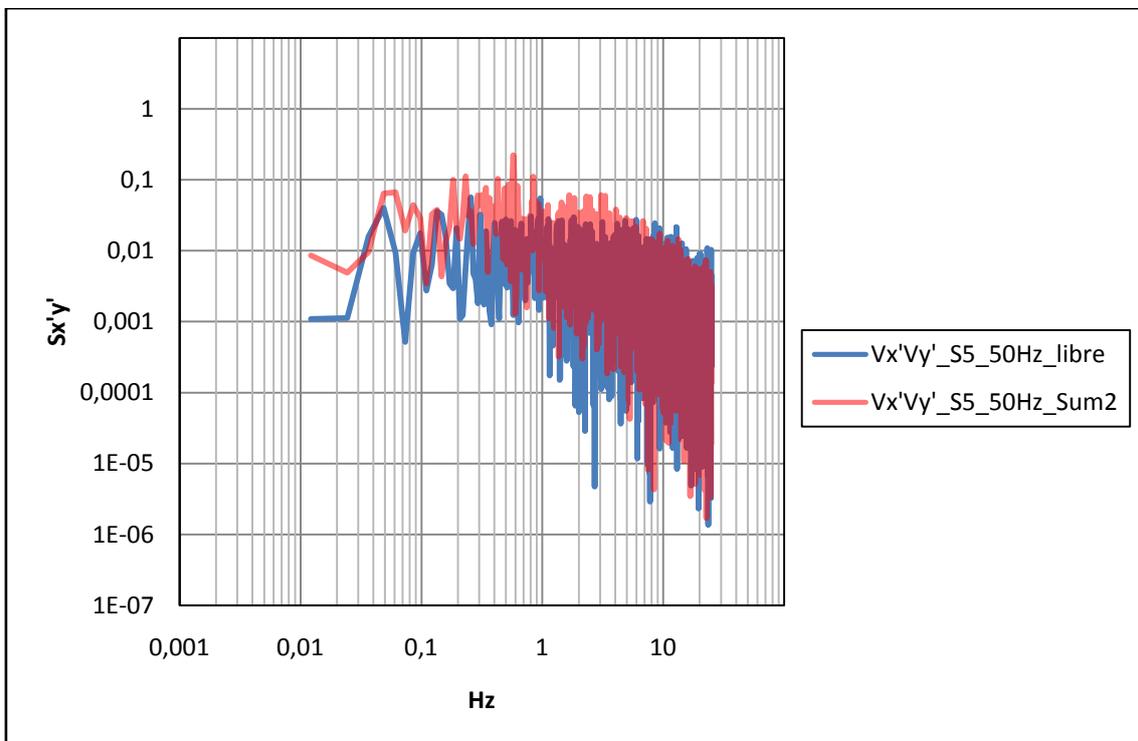


Figura A.IV.30. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_{x'}V_{y'}'$ en la sección 5 del resalto libre y del sumergido a 50Hz.

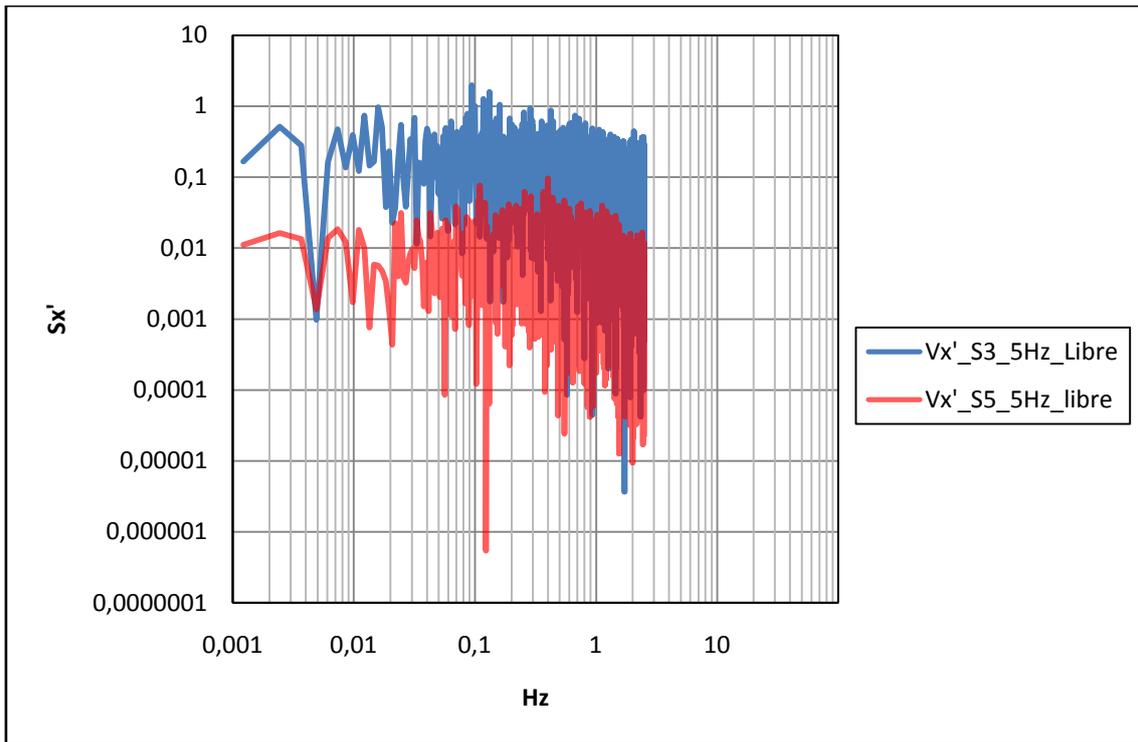


Figura A.IV.31. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 5Hz.

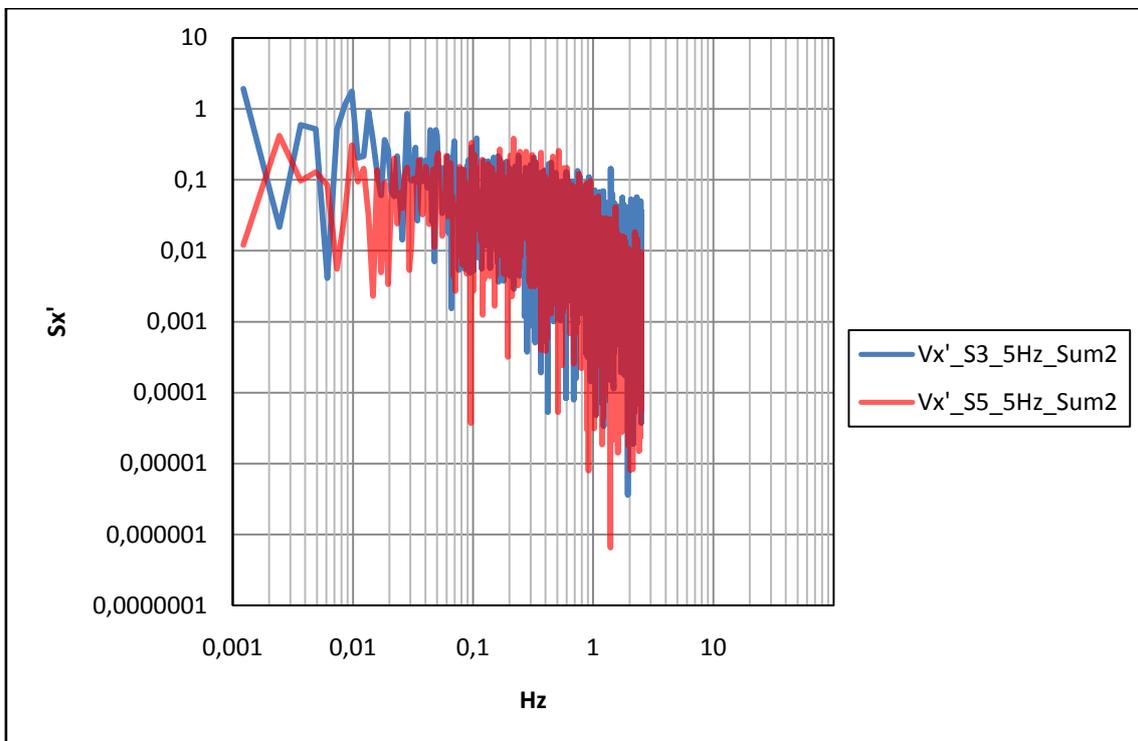


Figura A.IV.32. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 5Hz.

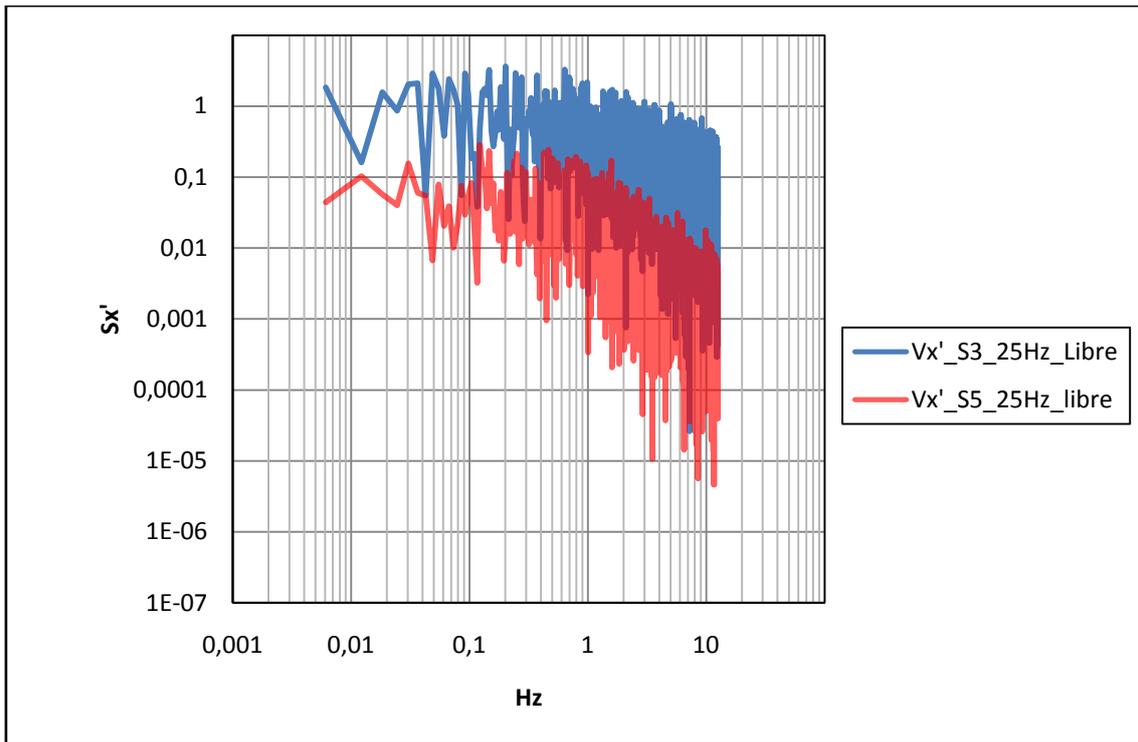


Figura A.IV.33. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 25Hz.

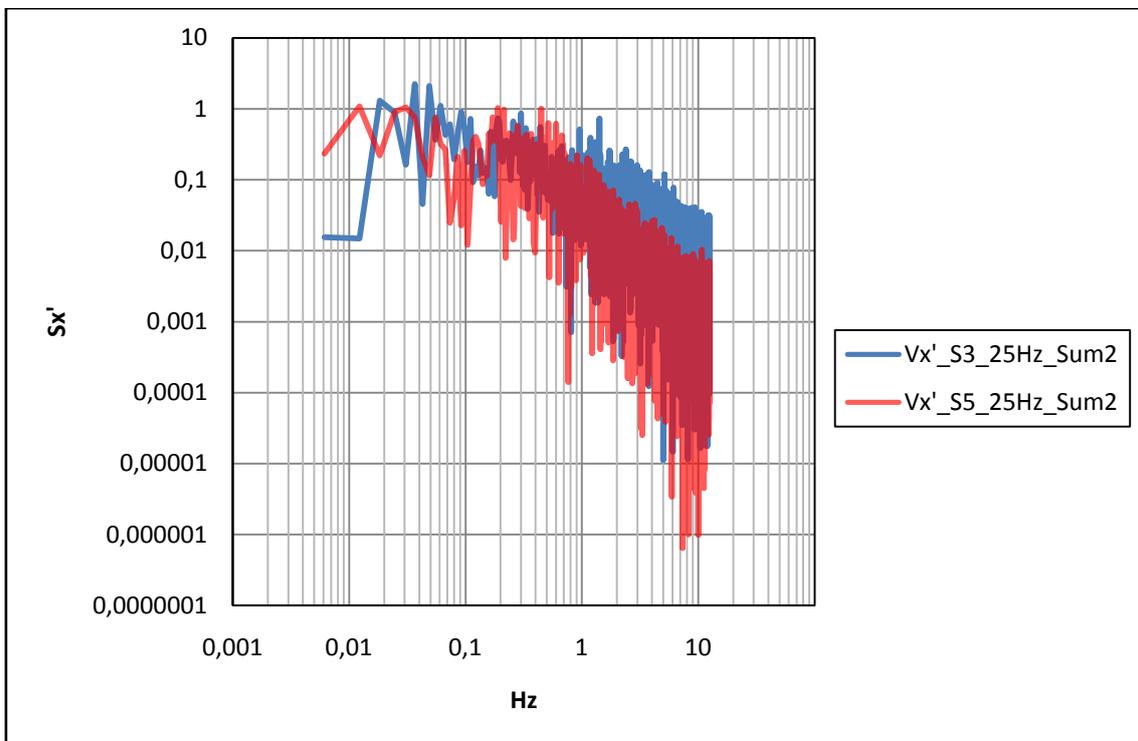


Figura A.IV.34. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_x' en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 25Hz.

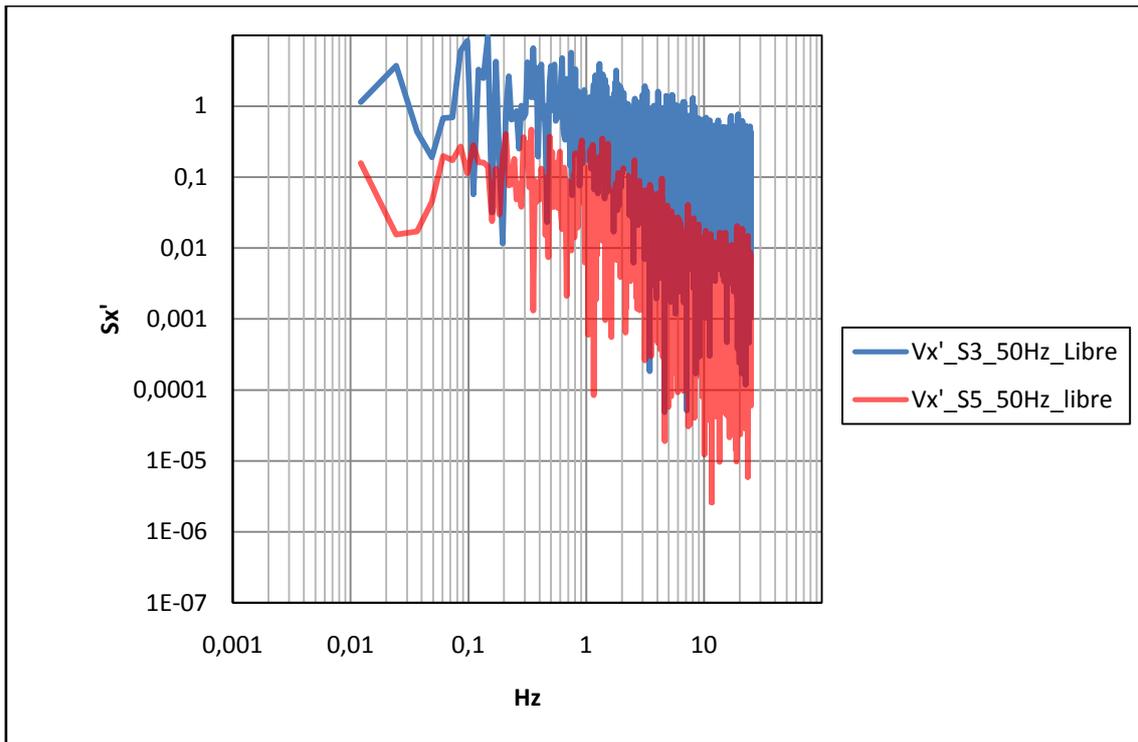


Figura A.IV.35. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 50Hz.

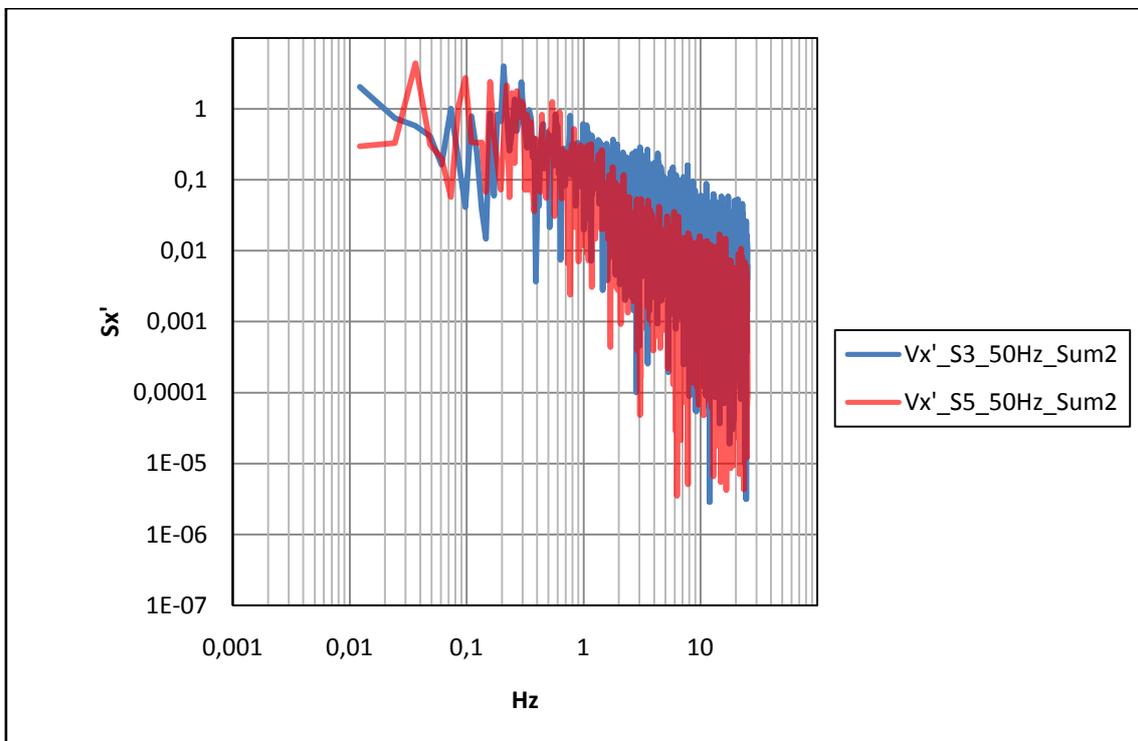


Figura A.IV.36. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante $V_{x'}$ en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 50Hz.

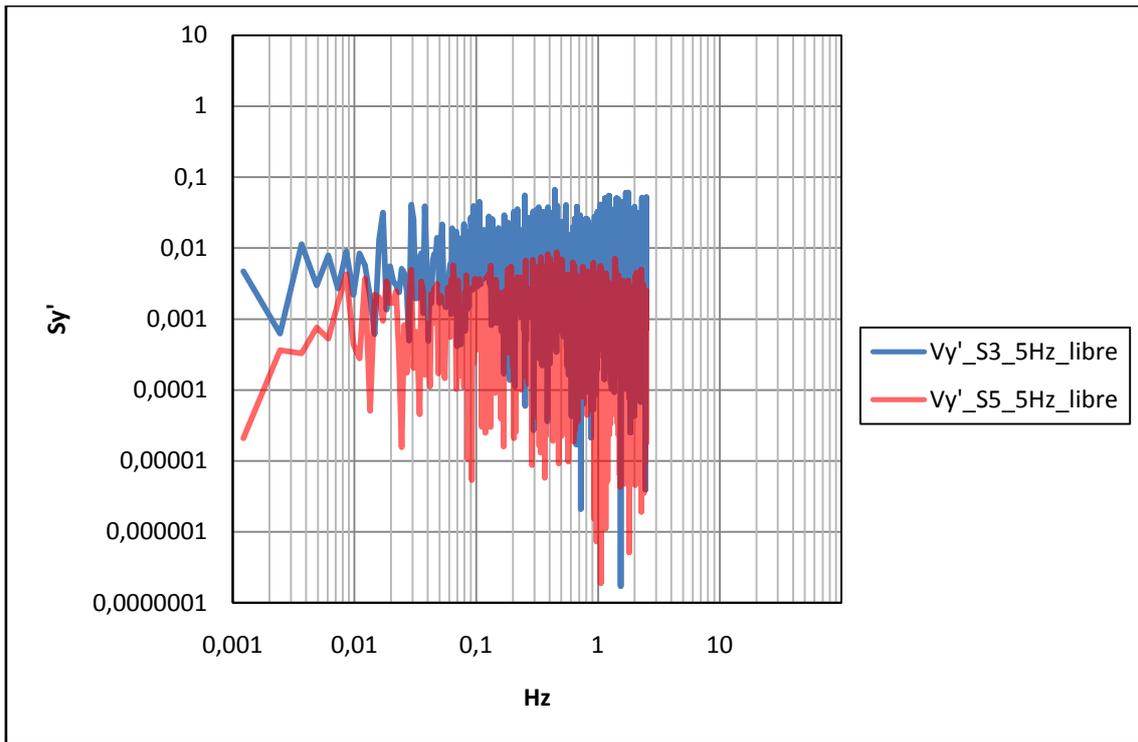


Figura A.IV.37. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 5Hz.

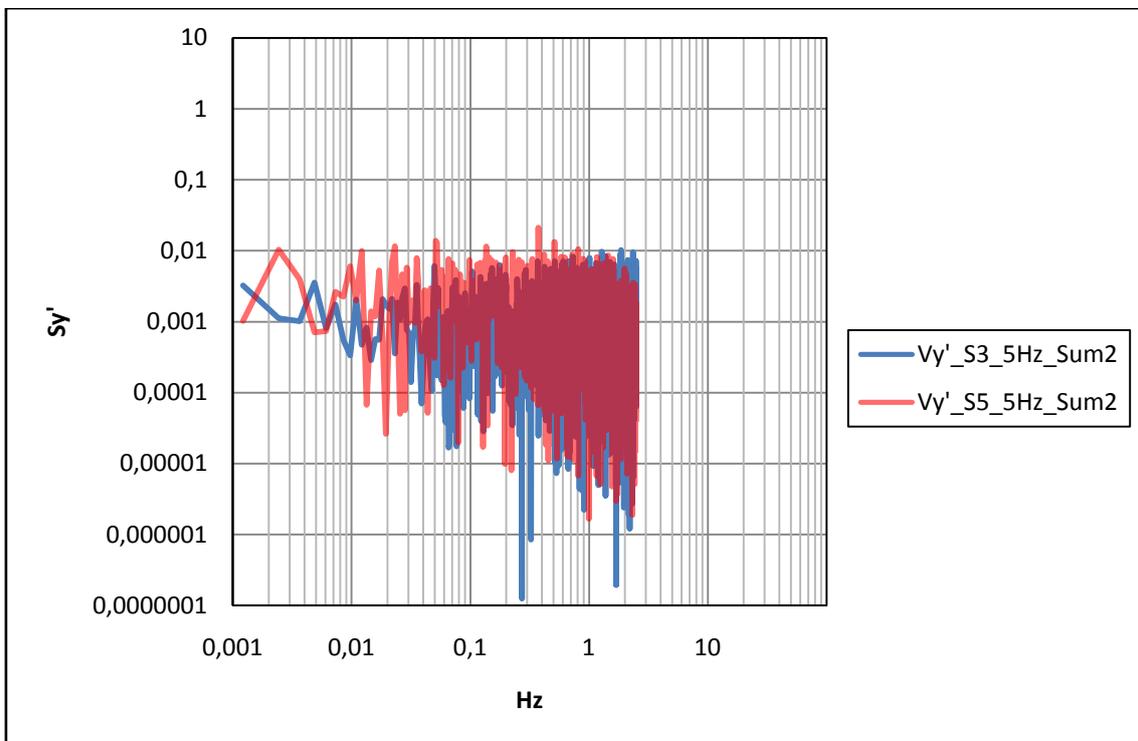


Figura A.IV.38. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 5Hz.

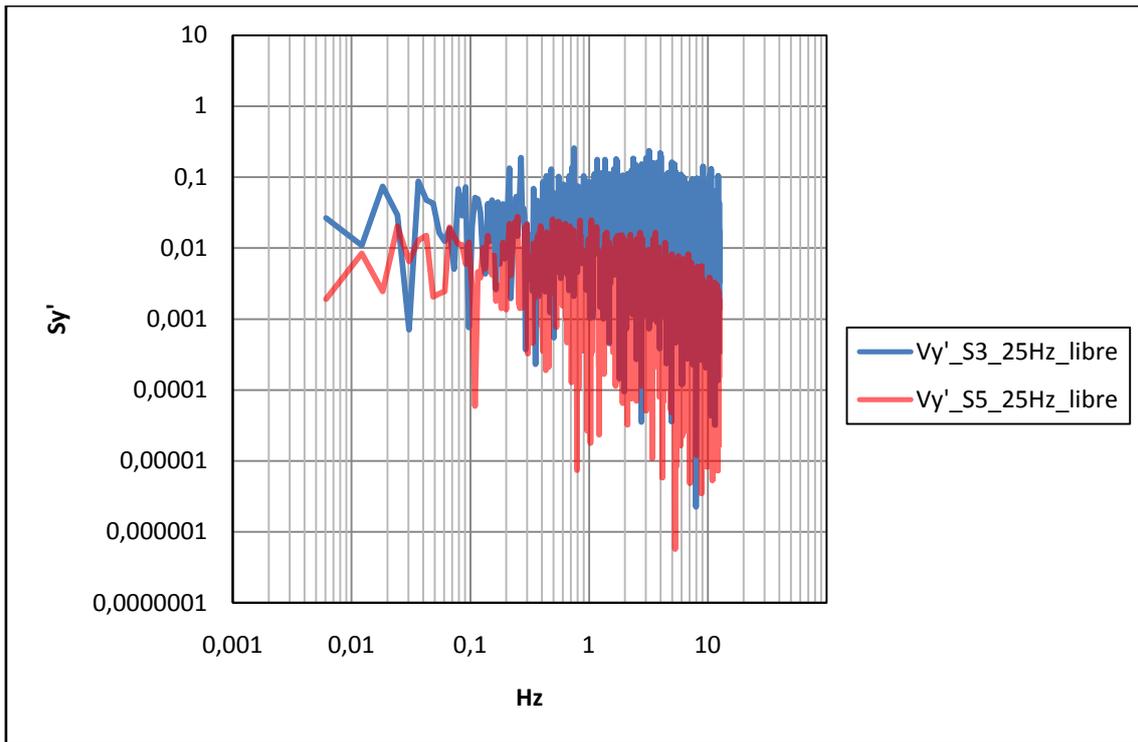


Figura A.IV.39. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 25Hz.

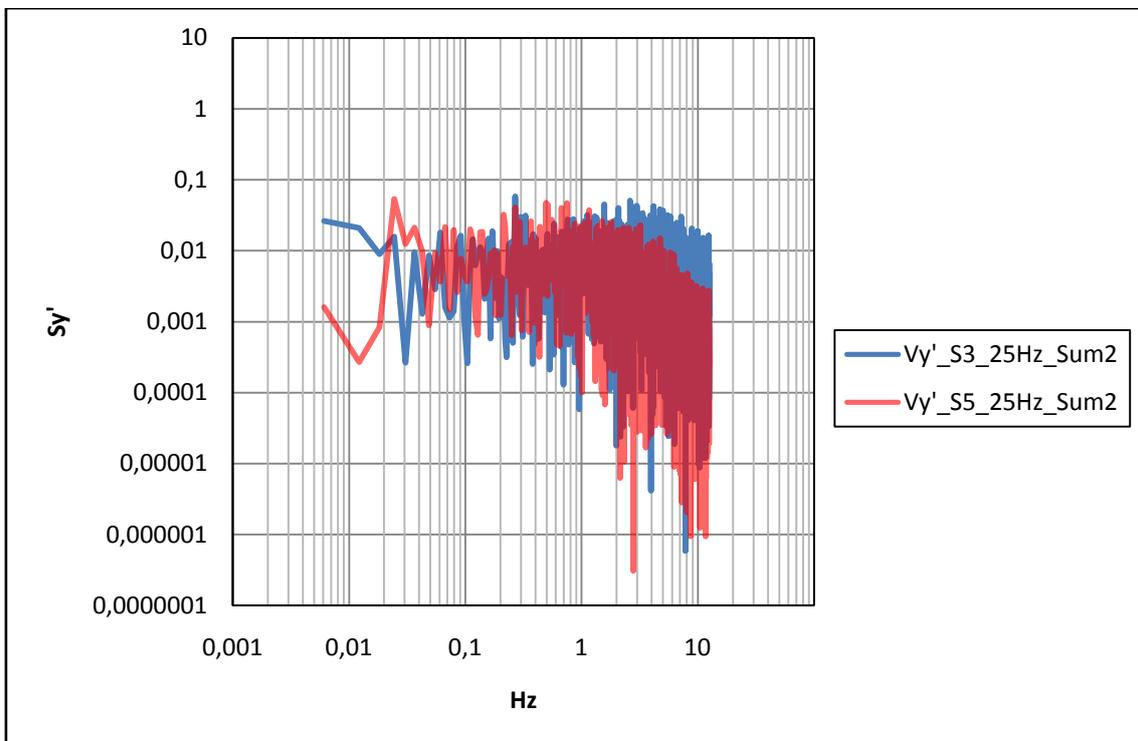


Figura A.IV.40. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 25Hz.

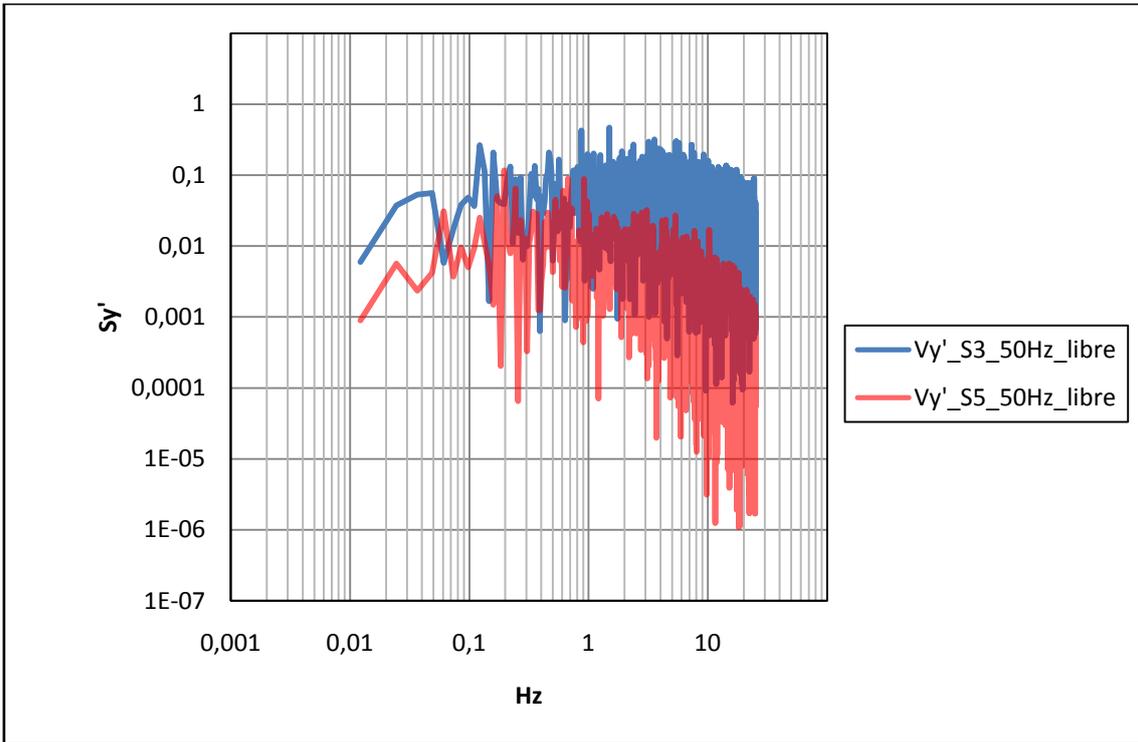


Figura A.IV.41. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 50Hz.

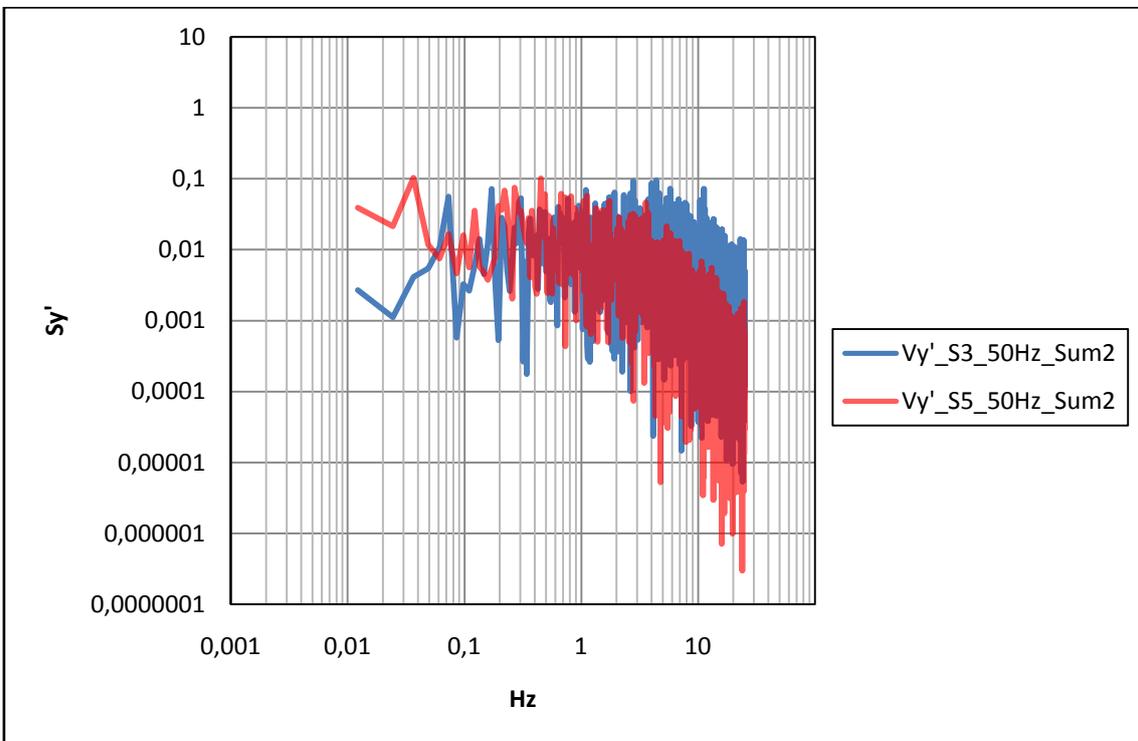


Figura A.IV.42. Descomposición frecuencial de la velocidad fluctuante V_y' en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 50Hz.

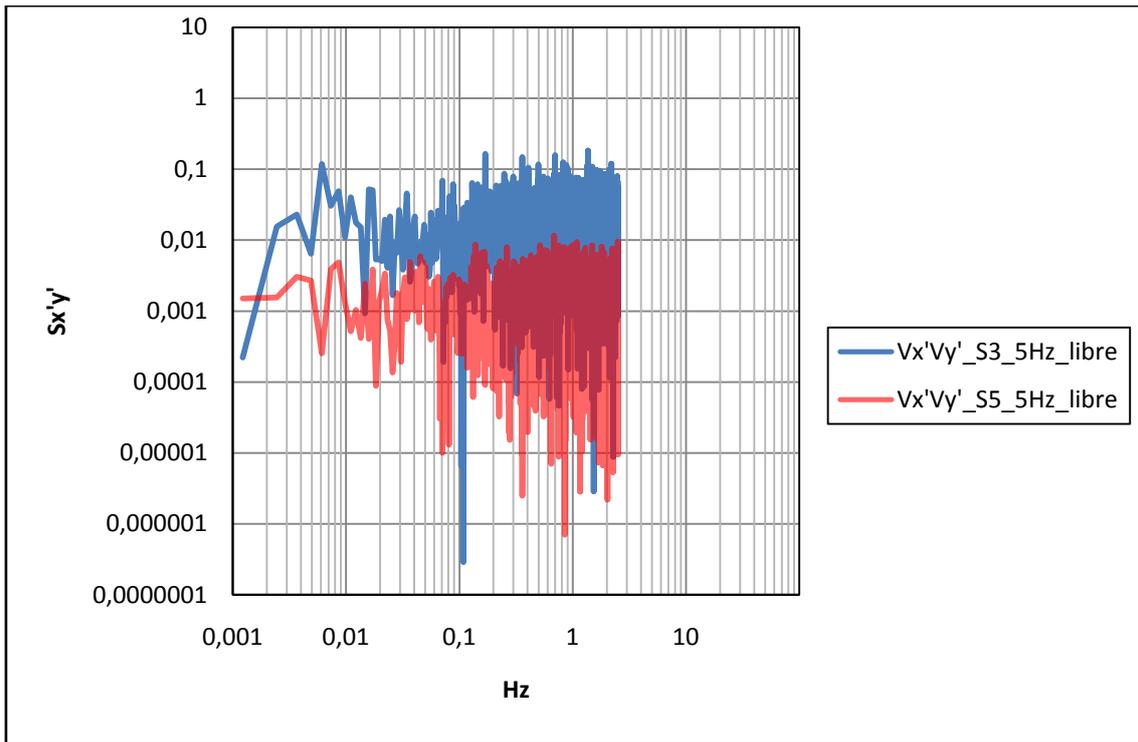


Figura A.IV.43. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 5Hz.

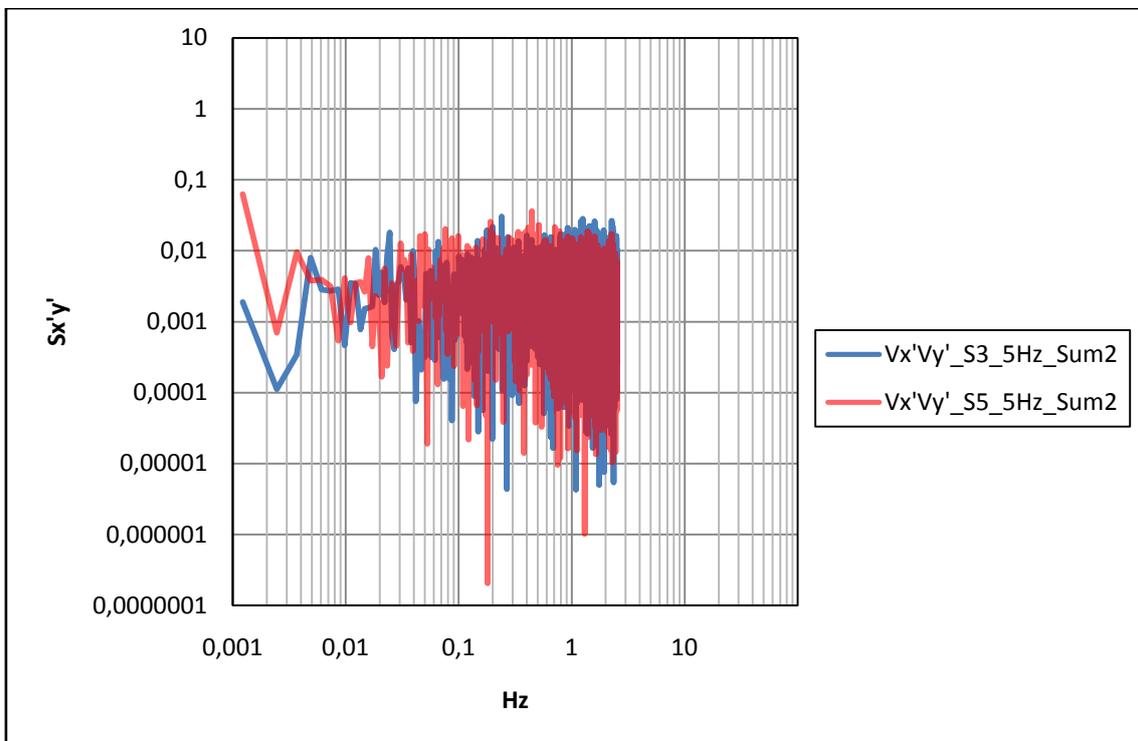


Figura A.IV.44. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 5Hz.

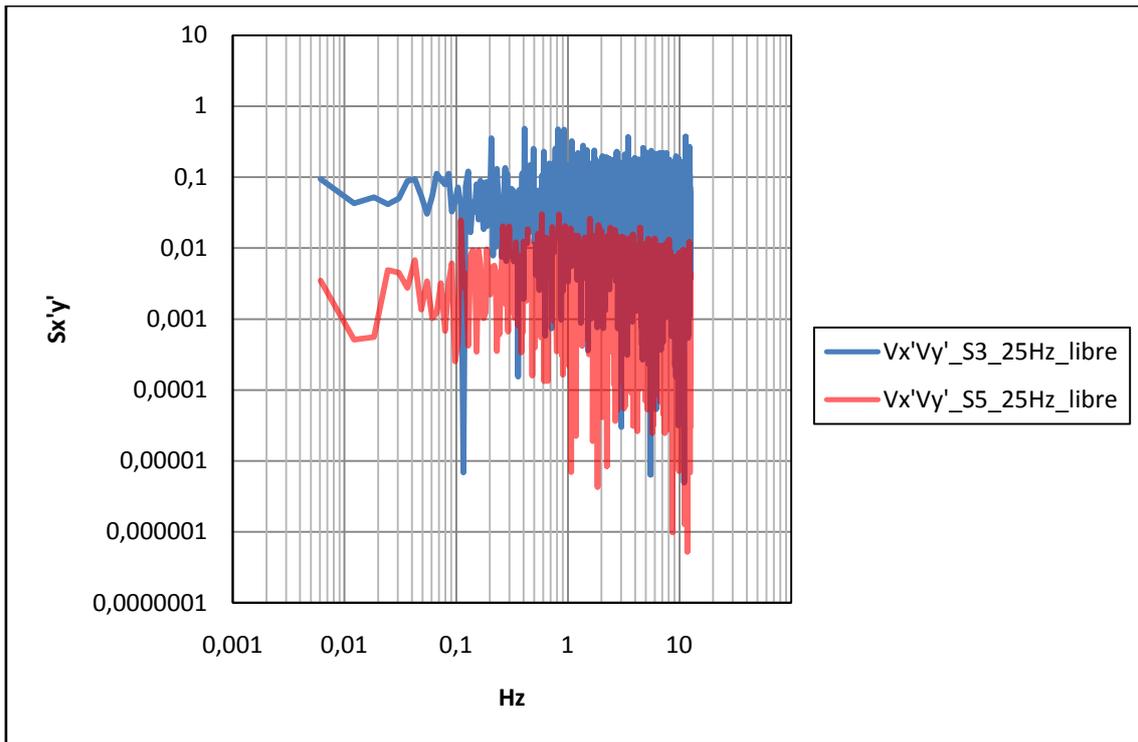


Figura A.IV.45. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 25Hz.

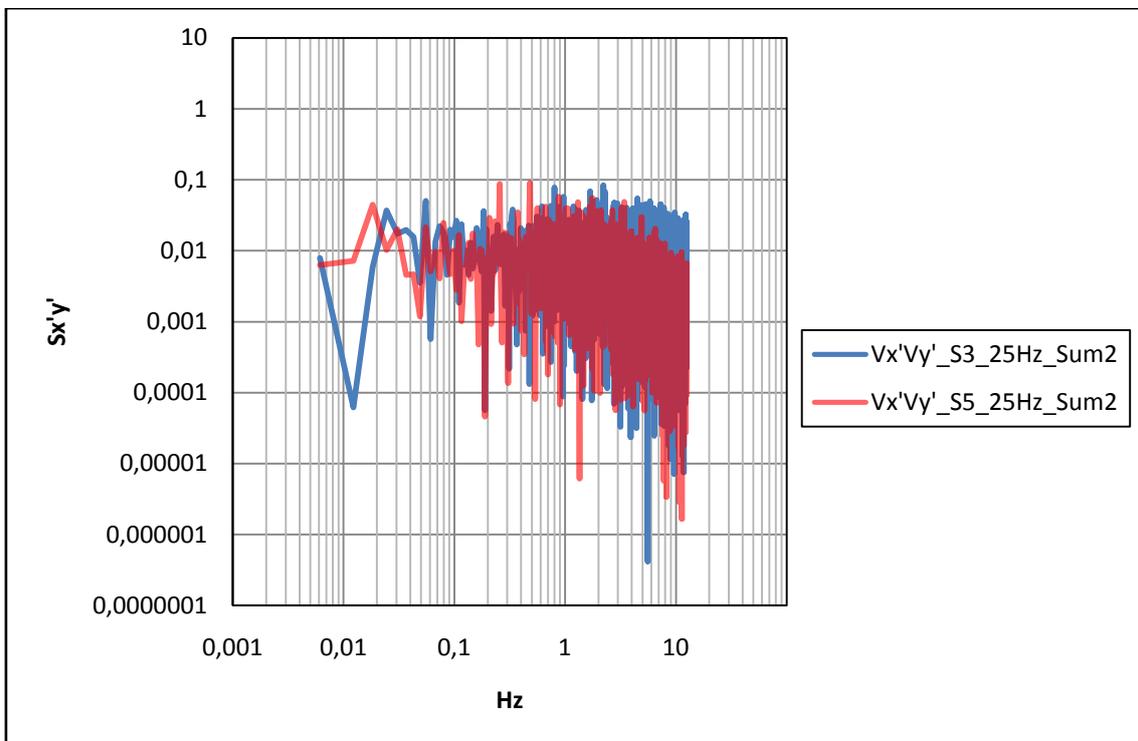


Figura A.IV.46. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 25Hz.

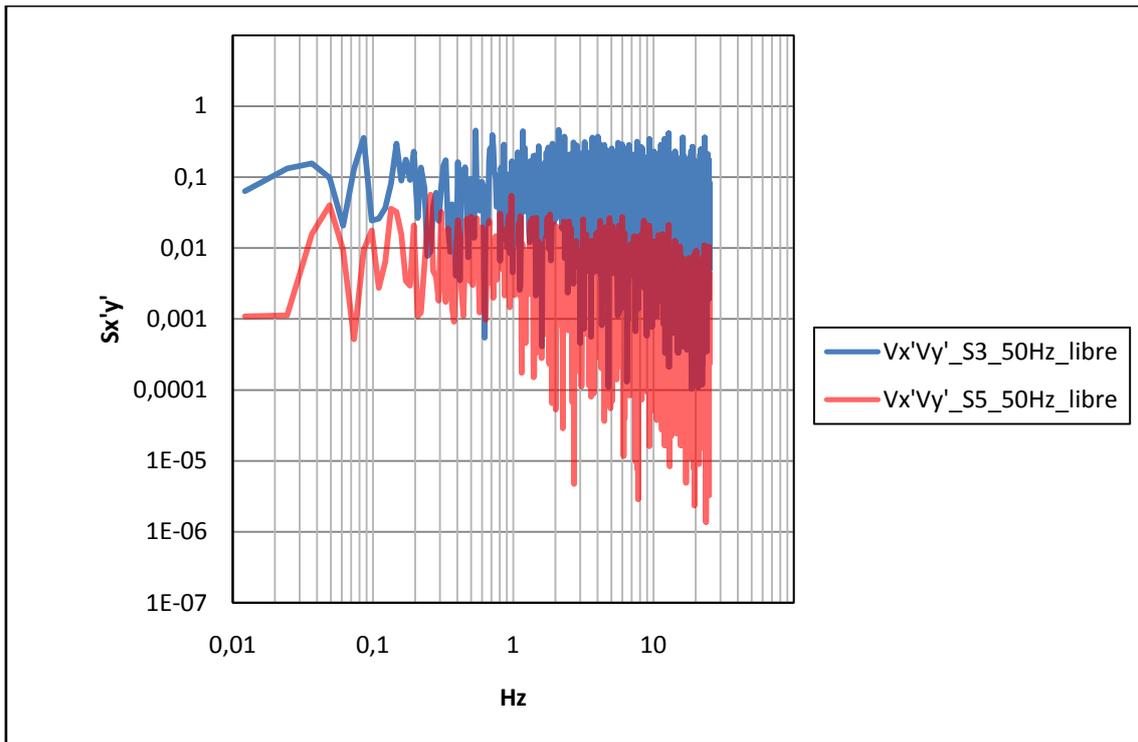


Figura A.IV.47. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la secciones 3 y 5 del resalto libre a 50Hz.

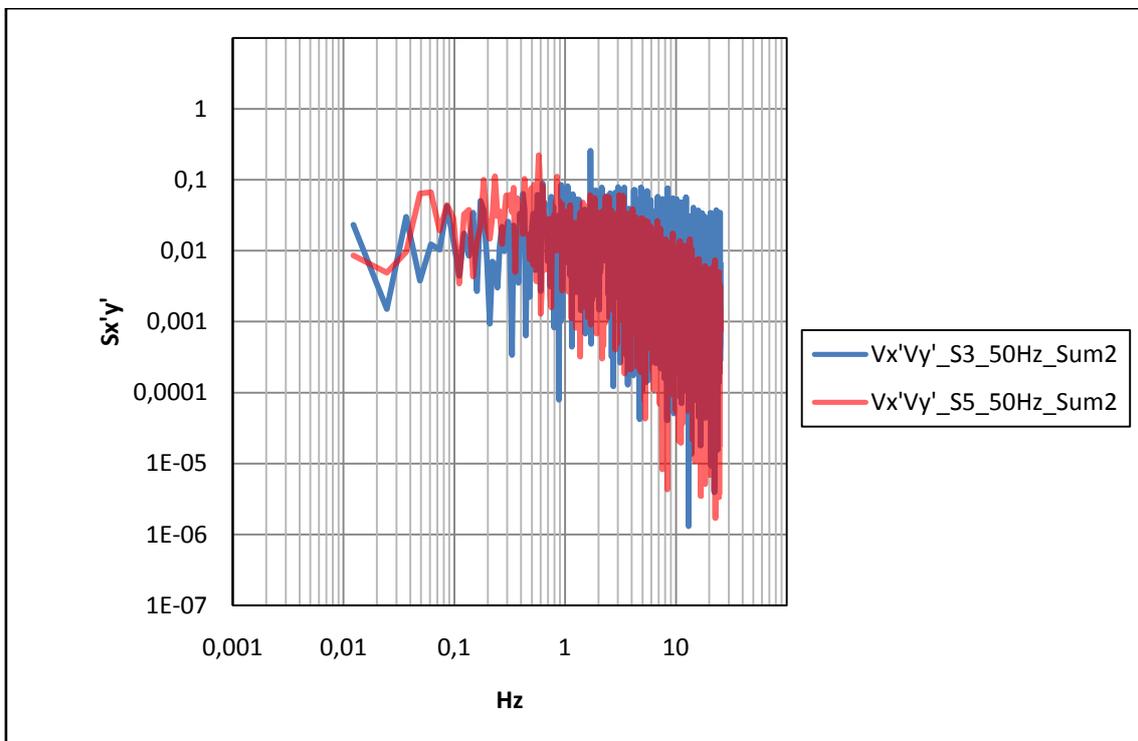


Figura A.IV.48. Descomposición frecuencial de la velocidad cortante $V_x'V_y'$ en la secciones 3 y 5 del resalto sumergido a 50Hz.

BIBLIOGRAFÍA

- **Blanckaert and Lemmin (2006).** “Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements”. International Association of Hydraulic Engineering and Research. Journal of Hydraulic Research Vol. 44, No. 1 (2006), pp. 3–17
- **Carrillo, J. M. (2004).** “Determinación Experimental de distribuciones de velocidades e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos”. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología, UPCT.
- **Castillo-E, L.G. (1989).** “Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica” Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.
- **Castillo-E, L.G. (2002).** “Apuntes de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos”. Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT.
- **Castillo-E, L.G. (2008).** “Validation of instantaneous velocities measurements with ADV equipment in turbulent high two-phase flows”. The Eight International Conference on Hydro-Science and Engineering (ICHE-2008). Nagoya, Japan, September, 8-12.
- **Castillo-E, L.G. (2009).** "Measurement of Velocities and Characterization of some Parameters Inside of Free and Submerged Hydraulic Jumps". 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Biennial Congress, IAHR; Vancouver, British Columbia, Canada. August 10-14.
- **French H. R. (1988).** “Hidráulica de canales abiertos”. McGraw-Hill.
- **García Rivas, S. (2008).** “Caracterización de resaltos hidráulicos libres a partir de velocidades instantáneas con equipo Doppler. Flujo aguas abajo de un aliviadero. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.

- **Kolmogoroff, A.N. (1941).** “The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers”. C. R. Acad. Sci. 30(301).
- **Márquez, MC. (2006).** “Caracterización paramétrica de resaltos hidráulicos libres y sumergidos a partir de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler”. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.
- **Naudascher, E. (2002).** “Hidráulica de canales. Diseño de estructuras”. Ed. Limusa.
- **Ranga Raju, K. G. (1998).** “Flow Through Open Channels” Ed. Tata McGraw-Hill.
- **Sontek ADV Field (2001).** “Acoustic Doppler Velocimeter”. Technical Documentation.
- **Ven Te Chow (1998)** “Hidráulica de canales abiertos” Ed. McGraw-Hill.
- **Vischer, D.L. and Hager, W.H. (1995)** “ Energy Dissipators” Hydraulic Design Considerations. Hydraulic Structures Design Normal N° 9 IAHR.